

ปริมาณการปลดปล่อยโลหะหนักและการรับสัมผัสผ่านทางหายใจจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์
แบบไม่ถูกสุขลักษณะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Emission of heavy metals and inhalation exposure from the informal dismantling
of television



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science

Inter-Department of Environmental Science

GRADUATE SCHOOL

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปริมาณการปลดปล่อยโลหะหนักและการรับสัมผัสผ่าน ทางการหายใจจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์แบบไม่ถูก สุขลักษณะ
โดย	น.ส.ศศนันท์ โกญจนาวรรณ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พุกกษาสีทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พุกกษาสีทธิ์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล)	

คณานต์ โภญจนาวรรณ : ปริมาณการปลดปล่อยโลหะหนักและการรับสัมผัสผ่านทางหายใจจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบไม่ถูกสุขลักษณะ. (Emission of heavy metals and inhalation exposure from the informal dismantling of television) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ทรรชนีย์ พฤกษาสีทธิ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณโลหะหนักทั้ง 11 ชนิดที่ดูดซับไว้บนอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร ($PM_{2.5}$) และระหว่าง 2.5 – 10 ไมโครเมตร ($PM_{10-2.5}$) ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบหลอตรังสีภาพคาโทด ๓ ตัวหลอดใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ แล้วนำไปคำนวณอัตราการปลดปล่อยโลหะหนักต่อผลิตภัณฑ์ และประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักทางการหายใจ ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาค $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ด้วยชุดปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศเฉพาะบุคคลที่ต่อกับ Personal Modular Impactors (PMI) ภายในตู้ปิด (Chamber) ขนาด 0.6 ลูกบาศก์เมตร โดยแบ่งการเก็บตัวอย่างเป็น 2 รูปแบบ คือ เก็บตัวอย่างตลอดกระบวนการและแบบแยกขั้นตอน แต่ละรูปแบบใช้ตัวอย่างซากโทรทัศน์ 30 เครื่อง วิเคราะห์ปริมาณสารหนู แบริียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี ด้วยเครื่อง ICP-MS ผลการศึกษาพบว่า การรื้อแยกซากโทรทัศน์ทั้งสองรูปแบบปลดปล่อยตะกั่ว สังกะสี และแบเรียมสูงกว่าโลหะหนักอื่นๆ ในขณะที่บริลเลียมมีค่าต่ำกว่าขีดความสามารถที่เครื่องวัดได้ (ND) ปริมาณการปลดปล่อยโลหะหนักรวมทั้ง 10 ชนิดใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ในพื้นที่ที่มีค่าเท่ากับ 1,499.60 และ 1,166.46 มิลลิกรัมต่อปี ตามลำดับ จากการประเมินความเสี่ยงของผู้รื้อแยกซากโทรทัศน์ในกรณีที่ได้รับสัมผัสโลหะหนักในระดับที่ปลดปล่อยจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ภายใน chamber ที่เป็นระบบปิดจำนวน 30 เครื่องต่อสัปดาห์ และทำงานต่อเนื่องเป็นเวลา 30 ปี ค่า HI ที่แสดงถึงระดับความเสี่ยงรวมจากการรับสัมผัสโลหะหนักที่ไม่ก่อมะเร็ง (สารหนู แบริียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี) ทั้งใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และระดับความเสี่ยงรวม (Total cancer risk) ของโลหะหนักที่ก่อมะเร็ง (สารหนู แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว) ทั้งใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ มีค่ามากกว่า 10^{-4} ซึ่งเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้เช่นกัน

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6087270120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Television, PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, heavy metal, emission, inhalation, risk assessment
 Kakanan Konjanawan : Emission of heavy metals and inhalation exposure from the informal dismantling of television. Advisor: Asst. Prof. TASSANEE CHETWITTAYACHAN

The objective of this study is to investigate the concentration of 11 heavy metals in particulate matter smaller than 2.5 μm (PM_{2.5}) and between 2.5 – 10 μm (PM_{10-2.5}) from the informal dismantling of television at Dang Yai, Baan Mai Chai Poj District, Buriram Province. Further estimation of those metals emission rates and health risk assessment of inhalation exposure was also performed. The PM sample was collected from the dismantling process operated in a closed chamber with a volume of 0.6 m³ by a Personal Modular Impactor (PMI) connected to a personal pump. Two sampling sets, including the sample taken from throughout the dismantling process and two sub-processes, were conducted. The concentrations of As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, and Zn were quantitatively analyzed by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS). The results showed that the average concentrations of Pb, Zn, and Ba in PM_{2.5} and PM_{10-2.5} emitted from both sizes of televisions were found much higher than other heavy metals, while Be was not detectable. The total emission of ten metals in PM_{2.5} and PM_{10-2.5} from the dismantling process were 1,499.60 and 1,166.46 mg/year, respectively. The health risk level was estimated for the workers by applying the concentration of the metals directly collected from the closed chamber and assumed that each worker dismantles 30 televisions/week and works for 30 years. Total non-cancer risks of exposure to all heavy metals except for Be in PM_{2.5} and PM_{10-2.5}, expressed as HI, were more than 1, which were higher than the acceptable risk. For cancer risk, total lifetime cancer risks were also higher than the acceptable risk of 10⁻⁴. This implied that the inhalation exposure to these heavy metals released from dismantling television can pose a health risk.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากโปรแกรมวิจัยการจัดการขยะและของเสียอันตรายชุมชน ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.)

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทรรศนีย์ พุกกาสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่างๆ ดูแลแก้ไขปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล รองศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ อิมอิม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นคณะกรรมการสอบ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณพัฒนธิดา ทองขาว คุณสรสันทน์ บุหงาแดง และคุณสิริวิภา จันทหงษ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่างๆ และให้ความช่วยเหลือตลอดทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณจันทร์เลขา ภูทองคำ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการหลักสูตรสหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่ตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ห้องปฏิบัติการที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และเจ้าหน้าที่ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

ขอขอบพระคุณ คุณธีรยุทธ์ พวงไธสง ที่อนุเคราะห์ให้ติดตั้งเครื่องมือเก็บตัวอย่าง และอำนวยความสะดวกในระหว่างการติดตั้งเครื่องและเก็บตัวอย่างเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และพนักงานของโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลบ้านเป่าพัฒนา จังหวัดบุรีรัมย์ในการช่วยอำนวยความสะดวก ให้ข้อมูลให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้คำปรึกษา รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

คณานต์ โภจนารรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	15
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	15
1.2 วัตถุประสงค์	17
1.3 สมมติฐานการวิจัย	17
1.4 ขอบเขตการศึกษา	17
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม.....	18
2.1 ขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย.....	18
2.2 การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย.....	18
2.3 สถานการณ์ปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ระดับท้องถิ่น.....	20
2.4 โทรศัพท์แบบหลอดภาพรังสีคาโทด.....	22
2.4.1 ส่วนประกอบของโทรศัพท์แบบหลอดภาพรังสีคาโทด	22
2.4.2 ขั้นตอนการแยกซากโทรศัพท์แบบหลอดภาพรังสีคาโทด	24
2.5 ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor).....	26
2.6 ฝุ่นละออง (Particulate matter).....	27

2.6.1	อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดต่ำกว่า 10 ไมโครเมตร (PM ₁₀).....	27
2.6.2	อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM _{2.5}).....	28
2.6.3	อันตรายจากการสัมผัสฝุ่นละออง.....	28
2.7	โลหะหนักที่ถูกปลดปล่อยจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์	29
2.8	หลักการการทำงานของ Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS)	31
2.9	การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Health Risk Assessment).....	31
2.9.1	การระบุความเป็นอันตรายของสาร (Hazard Identification).....	31
2.9.2	การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณที่ได้รับ (Dose-response Assessment)	32
2.9.3	การประเมินการรับสัมผัส (Exposure Assessment).....	32
2.9.4	การระบุค่าความเสี่ยง (Risk Characterization).....	33
บทที่ 3	วิธีดำเนินการ	36
3.1	พื้นที่ศึกษา.....	36
3.1.1	การกำหนดพื้นที่ศึกษา.....	36
3.1.2	รูปแบบการเก็บตัวอย่าง.....	37
3.2	อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง.....	38
3.2.1	อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง PM _{2.5} และ PM _{10-2.5}	38
3.2.2	การเตรียมกระดาศกรอง.....	38
3.2.3	การวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetric analysis).....	38
3.3	วิธีการทดลอง.....	39
3.3.1	จุดบันทึกรายละเอียดซากโทรทัศน์ก่อนการรื้อแยก.....	39
3.3.2	วิธีการเก็บตัวอย่างอนุภาค PM _{2.5} และ PM _{10-2.5}	39
3.3.3	การเก็บรักษาตัวอย่าง.....	40
3.3.4	การสกัดและวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างฝุ่นบนกระดาศกรอง	40
3.3.5	การควบคุมคุณภาพภายในห้องปฏิบัติการ	40

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	42
3.4.1 การคำนวณความเข้มข้นของ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5}	42
3.4.2 การคำนวณน้ำหนักของโลหะหนักในสารละลาย	42
3.4.3 การคำนวณปริมาณการรับสัมผัสโลหะหนักในอากาศ และความเข้มข้นของโลหะหนักที่ ปลดปล่อยในแต่ละขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรศัพท์	42
3.4.4 การคำนวณปริมาณโลหะหนักต่อน้ำหนัก PM _{2.5} และ PM _{10-2.5}	42
3.4.5 การคำนวณอัตราการปลดปล่อยโลหะหนัก (Emission rate)	43
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	43
3.6 การประเมินความเสี่ยง (Health Risk Assessment)	43
3.6.1 การระบุความเป็นอันตรายของสาร (Hazard Identification)	44
3.6.2 การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณที่ได้รับ (Dose-response Assessment)	44
3.6.3 การประเมินการรับสัมผัส (Exposure Assessment)	44
3.6.4 การระบุค่าความเสี่ยง (Risk Characterization)	46
3.7 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	48
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	49
4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น	49
4.1.1 ประสิทธิภาพการสกัดตัวอย่าง	49
4.1.2 กราฟมาตรฐาน (Calibration curves)	49
4.1.3 การทวนสอบความถูกต้องของค่าที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)	49
4.1.4 ค่า Limit of detection (LOD) และ Limit of quantization (LOQ)	50
4.2 ปริมาณอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM _{2.5}) และระหว่าง 2.5 – 10 ไมโครเมตร (PM _{10-2.5})	50
4.2.1 ปริมาณ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ตลอดกระบวนการ ..	51
4.2.2 ปริมาณ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์แบบแยกขั้นตอน	53

4.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักในอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM _{2.5}) และระหว่าง 2.5 – 10 ไมโครเมตร (PM _{10-2.5}).....	56
4.3.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ	56
4.3.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์เฉลี่ยต่อ 1 เครื่องแบบแยกขั้นตอน.....	62
4.4 อัตราการปลดปล่อยโลหะหนัก (Emission rate).....	72
4.5 การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของแรงงานที่รื้อแยกซากโทรทัศน์.....	77
4.5.1 การประเมินความเสี่ยงของสารไม่ก่อมะเร็ง.....	77
4.5.2 การประเมินความเสี่ยงของสารก่อมะเร็ง.....	80
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	86
5.1 สรุปผลการศึกษา	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก Calibration curves และค่า R ²	89
ภาคผนวก ข ปริมาณอนุภาคที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ	93
ภาคผนวก ค ปริมาณอนุภาคที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบแยกขั้นตอน.....	95
ภาคผนวก ง ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ... ..	97
ภาคผนวก จ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบแยกขั้นตอน	99
ภาคผนวก ฉ ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษ.....	102
ภาคผนวก ช การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของแรงงานที่รื้อแยกซากโทรทัศน์	104
บรรณานุกรม.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบหลักของโทรทัศน์แบบหลอดภาพรังสีคาโทด.....	22
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของโทรทัศน์แบบหลอดรังสีภาพคาโทด	24
ตารางที่ 2.3 ขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบหลอดรังสีภาพคาโทด	25
ตารางที่ 2.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศของ PM ₁₀ และ PM _{2.5}	28
ตารางที่ 2.5 โลหะหนักที่ถูกปลดปล่อยจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์	29
ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่าง PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่ทำการศึกษา	37
ตารางที่ 3.2 ค่าที่เกี่ยวข้องในการคำนวณอัตราการปลดปล่อยโลหะหนักจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์	43
ตารางที่ 3.3 การระบุค่าความเป็นอันตรายจากโลหะหนักในขยะอิเล็กทรอนิกส์.....	44
ตารางที่ 3.4 Inhalation reference concentration, Cancer slope factor และ Inhalation unit risk ของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิด.....	45
ตารางที่ 3.5 ความหมายของตัวแปรที่ใช้แทนค่าในสมการการรับสัมผัสทางการหายใจ	46
ตารางที่ 4.1 ผลการประกันคุณภาพในการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	50
ตารางที่ 4.2 ปริมาณ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ ...	51
ตารางที่ 4.3 ปริมาณ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 เครื่องแบบแยกขั้นตอน.....	54
ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ	58
ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์เฉลี่ยต่อ 1 เครื่อง.....	63
ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการทุบจอซากโทรทัศน์เฉลี่ยต่อ 1 เครื่องแบบแยกขั้นตอน.....	70
ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของโลหะหนักรวมใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 เครื่องแบบแยกขั้นตอน	71

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 เครื่อง	74
ตารางที่ 4.9 การปลดปล่อยโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ของชุมชนในพื้นที่ศึกษา	76
ตารางที่ 4.10 ค่า EC ค่า HQ ของสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง และค่า 95% Confidence level จากการสัมผัส PM _{2.5} และ PM _{10-2.5}	78
ตารางที่ 4.11 ค่า Hazard index (HI) ของ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5}	79
ตารางที่ 4.12 ค่า CDI ค่า Cancer risk ของสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง และค่า 95% Confidence level จากการสัมผัส PM _{2.5} และ PM _{10-2.5}	80
ตารางที่ 4.13 ค่า Total Cancer risk ของ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5}	81
ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ย HQ ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา.....	83
ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบค่า Lifetime cancer risk กับการศึกษาอื่น	84
ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบค่า HQ และ ค่า Total cancer risk จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์กับผลการศึกษาก่อนหน้า และค่า Background	85
ตารางที่ ข.1 ปริมาณ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ	93
ตารางที่ ข.2 ปริมาณ PM ₁₀ และ PM _{2.5/10} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ.....	94
ตารางที่ ค.1 ปริมาณอนุภาค PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์.....	95
ตารางที่ ค.2 ปริมาณอนุภาค PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} จากการทูลอบจอกซากโทรทัศน์	95
ตารางที่ ค.3 ปริมาณอนุภาค PM ₁₀ และ PM _{2.5/10} จากการแยกชิ้นส่วน และทูลอบจอกซากโทรทัศน์	96
ตารางที่ ง.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ... ..	97
ตารางที่ ง.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{10-2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ	98
ตารางที่ จ.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} ที่เกิดจากกระบวนการแยกชิ้นส่วน.....	99
ตารางที่ จ.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} ที่เกิดจากกระบวนการทูลอบจอก.....	99
ตารางที่ จ.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{10-2.5} ที่เกิดจากกระบวนการแยกชิ้นส่วน	100

ตารางที่ จ.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากกระบวนการทุบจ่อ	100
ตารางที่ จ.5 ความเข้มข้นของโลหะหนักรวมใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการรื้อแยกซาก โทรทัศน์แบบแยกชิ้นตอน.....	101
ตารางที่ ฉ.1 ค่าตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักใน $PM_{2.5}$	102
ตารางที่ ฉ.2 ค่าตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักใน $PM_{10-2.5}$	103
ตารางที่ ช.1 ค่าประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารกลุ่มไม่ก่อมะเร็ง (HQ) ใน $PM_{2.5}$	104
ตารางที่ ช.2 ค่าประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารกลุ่มไม่ก่อมะเร็ง (HQ) ใน $PM_{10-2.5}$	105
ตารางที่ ช.3 ค่าประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารกลุ่มก่อมะเร็ง (Lifetime cancer risk)	106



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย	19
รูปที่ 2.2 กระบวนการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่ถูกสุขลักษณะ	21
รูปที่ 3.1 คริวเรือนที่ประกอบอาชีพรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์	36
ในพื้นที่ตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์	36
รูปที่ 3.2 การเก็บตัวอย่าง PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} จากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์เท่านั้นภายใน chamber	38
รูปที่ 3.3 แผนขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	48
รูปที่ 4.1 ปริมาณ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ	52
รูปที่ 4.2 ปริมาณ PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} จากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์ 1 เครื่อง	53
รูปที่ 4.3 สัดส่วนระหว่าง PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} กับ PM ₁₀ จากแต่ละขั้นตอนการรีไซเคิลซากโทรทัศน์	56
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์ขนาดเล็กตลอดกระบวนการ	59
รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ตลอดกระบวนการ	59
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ	61
รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์	64
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์	66
รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการทุบจอซากโทรทัศน์	67
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM _{2.5} และ PM _{10-2.5} ที่เกิดจากการทุบจอซากโทรทัศน์	69

รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของโลหะหนักรวมใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการรื้อแยก.....	72
ซากโทรทัศน์ 1 เครื่องแบบแยกขั้นตอน.....	72
รูปที่ 4.12 ค่ากลางของตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยก	73
ซากโทรทัศน์เฉลี่ยรายเครื่อง.....	73
รูปที่ 4.13 สัดส่วนการปลดปล่อยโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์..	75
รูปที่ 4.14 95% Confidence level ของค่า HQ จากการสัมผัส $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$	79
รูปที่ 4.15 95% Confidence level ของค่า Cancer risk จากการสัมผัส $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$	81
รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ย HQ ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา	82
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่า Lifetime cancer risk กับการศึกษาอื่น.....	84



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สืบเนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีระบบการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ครบวงจร ทำให้ขยะอิเล็กทรอนิกส์ถูกเก็บไว้ในครัวเรือนทั้งที่ใช้งานไม่ได้แล้วหรือถูกทิ้งปะปนไปกับขยะมูลฝอยทั่วไป ปัจจุบันขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากแหล่งชุมชนส่วนมากจะถูกเก็บรวบรวมผ่านร้านรับซ่อมหรือร้านรับซื้อของเก่า โดยท้ายที่สุดขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้จะถูกนำไปยังชุมชนที่มีอาชีพทำการรีไซเคิลอย่างไม่ถูกสุขลักษณะ (พัลลอง มั่นดี, 2558) จากการสำรวจของกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ปี 2557 พบว่า มีแหล่งชุมชนรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์กระจายอยู่ทั่วประเทศกว่า 100 แห่ง ในพื้นที่ 17 จังหวัด แหล่งชุมชนที่ทำอาชีพนี้ที่เป็นแหล่งขนาดใหญ่อยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ยกตัวอย่างเช่น พื้นที่ตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ และ ตำบลบ้านเป่า อำเภอพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์ จัดเป็นชุมชนที่มีการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ใหญ่เป็นอันดับ 2 ของประเทศไทย (สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย, 2560)

การดำเนินกิจการของชุมชนมีวงจรการรีไซเคิลที่เริ่มจากการรับซื้อขยะอิเล็กทรอนิกส์จากร้านรับซื้อของเก่ารายใหญ่และขนส่งมายังบริเวณลานบ้านที่พักอาศัยเพื่อคัดแยก โดยผู้ประกอบการจะทำการแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่ เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก และอุปกรณ์ชิ้นส่วนไฟฟ้า จากนั้นแยกชิ้นส่วนหลักออกจากกัน เพื่อนำโลหะมีค่าภายในออกมาด้วยวิธีการเจาะ แกะ ทุบ หรือเผา ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดของซากผลิตภัณฑ์ เมื่อทำการแยกชิ้นส่วนเรียบร้อยแล้วผู้ประกอบการจะนำชิ้นส่วนวัสดุโลหะที่มีค่าและพลาสติกประเภทต่างๆ ไปขาย ส่วนเศษที่เหลือจะนำไปเผาหรือทิ้งอย่างไม่ถูกวิธีโดยในแต่ละขั้นตอนการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ปฏิบัติงานรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์มีวิธีการที่ไม่ถูกสุขลักษณะและไม่ได้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ (คณานต์ โกลุจนวนรณ และ ณิชารีย์ สารพันธุ์, 2559)

จากรูปแบบการรีไซเคิลที่ไม่ถูกสุขลักษณะดังกล่าว มีความเป็นไปได้ว่าการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์เป็นสาเหตุของการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ เช่น สารในกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารไดออกซิน และสารฟิวแรน ตลอดจนสารอินทรีย์อันได้แก่ โลหะหนัก ซึ่งเป็นส่วนประกอบในชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ ไม่ว่าจะเป็นตะกั่วในชิ้นส่วนจอตอร์ทัศน์ แผ่นวงจรพิมพ์ และแบตเตอรี่ หรือพลวงในชิ้นส่วนหลอดภาพรังสีคาโทด แผ่นวงจรพิมพ์ และโทรศัพท์มือถือ นอกจากนี้ ยังมีทองแดงในสายไฟ และโลหะหนักอื่นๆ (Robinson, 2009) ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในพื้นที่ที่มีการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศจีนและประเทศอินเดีย พบโลหะหนักหลายชนิดในฝุ่นขนาดอนุภาคฝุ่นที่มี

ขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM_{2.5}) อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดต่ำกว่า 10 ไมโครเมตร (PM₁₀) และฝุ่นละอองรวม (TSP) ในบรรยากาศทั่วไป เช่น ทองแดง ตะกั่ว ปรอท สารหนู แคดเมียม และโครเมียม เป็นต้น (Brigden, 2005; Huang et al., 2016; Song, Zeng, Li, Duan, & Yuan, 2015)

ข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษปี พ.ศ. 2546 พบว่า มีปริมาณซากโทรทัศน์ที่ไม่มีศักยภาพในการรีไซเคิลสูงถึง 5,659 ตัน ซึ่งถือว่ามีปริมาณสูงที่สุดจากปริมาณซากเครื่องใช้ไฟฟ้าที่รวบรวมได้ และมีสารอันตรายที่เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการจัดการอย่างถูกวิธี เช่น สารหนู เบริลเลียม แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) อีกทั้งการศึกษาวิจัยในประเทศจีนที่ผ่านมาพบว่า มีการปลดปล่อยโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม และนิกเกิล จากโรงงานรีไซเคิลโทรทัศน์ (J. Deng et al., 2014) รวมถึงข้อมูลจากการวิจัยของคณานต์ โกญจนวรรณ และ นิธารีย์ สารพันธุ์ (2559) ที่พบว่าโทรทัศน์เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ผู้ประกอบการในตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ ได้ทำการรวบรวมมาเพื่อทำการรื้อแยกซากผลิตภัณฑ์ อีกทั้งข้อมูลจากการจัดบันทึกกิจกรรมการรื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ของผู้ประกอบการและการวิเคราะห์ผลความเข้มข้นของโลหะหนัก พบว่าในวันที่มีขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งในการรื้อแยกซากโทรทัศน์ มีผลทำให้ผลความเข้มข้นของโลหะหนักที่ดูดซับไว้บน PM₁₀ สูงกว่าวันที่ทำการรื้อแยกผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ อย่างชัดเจน นอกจากนี้มีงานวิจัยจำนวนไม่น้อยที่ได้รายงานถึงผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมจากขั้นตอนการทุบทำลายจอโทรทัศน์แบบหลอดภาพรังสีคาโทด ที่มีส่วนประกอบของสารอันตรายอยู่ภายในจอ เป็นสาเหตุของการปลดปล่อยสารอันตรายออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ทำลายโอโซนและก๊าซเรือนกระจก (สุจิตรา วาสนาดำรงดี และ ปเนต มโนมัยวิบูลย์, 2555)

ด้วยปริมาณซากผลิตภัณฑ์โทรทัศน์ที่รับเข้ามาในชุมชนในปริมาณมาก และมีโลหะหนักหลายชนิดที่ตรวจพบในขั้นตอนการรื้อแยก ได้แก่ สารหนู เบริลเลียม แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) โลหะหนักดังกล่าวมีความสามารถในการเกาะติดบนอนุภาค ซึ่งอาจเป็นต้นเหตุของปัญหาสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานจากการสัมผัสผ่านทาง การหายใจซึ่งเป็นโอกาสในการสัมผัสโดยตรง และส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพในระยะยาวได้ (Bi et al., 2010; W. J. Deng et al., 2006; Puangprasert & Prueksasit, 2019)

จากข้อมูลข้างต้น เพื่อนำไปสู่แนวทางการจัดการสภาพแวดล้อมและเป็นข้อมูลในการแนะนำแก่ผู้ประกอบการรื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์เกี่ยวกับการป้องกันอันตรายส่วนบุคคลขณะปฏิบัติงานที่ดียิ่งขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องทราบถึงการปลดปล่อยสารอันตรายโดยเฉพาะโลหะหนักจากขั้นตอนต่างๆ ในการรื้อแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นเหตุให้ผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสในการสัมผัสโดยตรง ซึ่งการสัมผัสผ่านทาง การหายใจถือเป็นเส้นทางการรับสารเข้าสู่ร่างกายเป็นหลัก ดังนั้น การศึกษาค้นคว้าวิจัยมุ่งเน้นการเก็บตัวอย่าง PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรทัศน์ และนำมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะ

หนัก พร้อมทำการประเมินความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นจากการรับสัมผัสผ่านทางหายใจของผู้รื้อแยก
โทรทัศน์ ณ ตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อหาปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับไว้บน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่ปลดปล่อยจากแต่ละขั้นตอนของการรื้อแยกซากโทรทัศน์
- 2) เพื่อหาปริมาณการปลดปล่อยโลหะหนักต่อผลิตภัณฑ์ จากกิจกรรมการรื้อแยกซากโทรทัศน์
- 3) เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพที่เพิ่มขึ้นจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักในกรณีทำงานรื้อแยกซากโทรทัศน์

1.3 สมมติฐานการวิจัย

- 1) ปริมาณการปลดปล่อยโลหะหนักจากขั้นตอนการแยกหลอดภาพรังสีคาโทดและการทaping แก้วสูงกว่าขั้นตอนการรื้อ/แยกชิ้นส่วนตู้ Cabinet แผ่นวงจรพิมพ์ ปีนีโอเล็คตรอน และสายไฟ
- 2) ค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพรวมจากการได้รับสัมผัสทางการหายใจของโลหะหนักที่ไม่ก่อมะเร็ง และโลหะหนักที่ก่อมะเร็งจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์มีค่าเกินค่าที่ยอมรับได้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาการรื้อแยกซากโทรทัศน์ในพื้นที่ตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ ในช่วงเดือนมีนาคม – ธันวาคม 2562 โดยเก็บตัวอย่าง $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากกิจกรรมการรื้อแยกซากโทรทัศน์ภายใน Chamber ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศเฉพาะบุคคล (Leland Legacy Sample Pump) ต่อกับหัวคัดขนาดฝุ่น Personal Modular Impactors (PMI) จากนั้นสกัดโลหะหนักด้วยเครื่อง Microwave digester และวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก 11 ชนิด ได้แก่ สารหนู เบริลเลียม แบเรียม แคลเซียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ข้อมูลพื้นฐานการปลดปล่อยโลหะหนักในแต่ละขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรทัศน์ และการปลดปล่อยโลหะหนักต่อซากผลิตภัณฑ์โทรทัศน์สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางป้องกันการรับสัมผัสโลหะหนักผ่านทางหายใจให้กับบุคคลที่รื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ และนำค่าความเสี่ยงที่ได้ไปหาแนวทางในการจัดการความเสี่ยงที่เหมาะสม โดยผ่านการสื่อสารความเสี่ยงให้กับบุคคลที่รื้อแยกซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย

การพัฒนาของเทคโนโลยี และการเติบโตของเศรษฐกิจของประเทศไทย ส่งผลให้เกิดความต้องการและขยายตัวของสินค้าประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยเฉพาะเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน เช่น เครื่องปรับอากาศ โทรทัศน์ เครื่องทำน้ำอุ่น คอมพิวเตอร์ และโทรศัพท์มือถือ มีอัตราความต้องการที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านี้ก็มียุการใช้งานที่สั้นลง ขำรดหรือล้าสมัยเร็วขึ้น จนกลายเป็นซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หรือขยะอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณที่มากขึ้น กลายเป็นภาระในการกำจัดซาก (ณิชา บุณยสิทธิ์, 2559) จากสถิติของกรมควบคุมมลพิษปี 2558 พบว่าปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2558 มีปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ 384,233 ตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 357,000 ตัน ในปี 2555 ถึง 27,233 ตัน/ปี จากปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวพบซากซากโทรทัศน์ในปริมาณมากที่สุด (106,355 ตัน หรือร้อยละ 27) รองลงมาคือเครื่องปรับอากาศ (74,799 ตัน หรือร้อยละ 19) ตู้เย็น (66,765 ตัน หรือร้อยละ 17) เครื่องซักผ้า (60,492 ตัน หรือร้อยละ 16) คอมพิวเตอร์ (57,058 ตัน หรือร้อยละ 15) และอื่นๆ ตามลำดับ

จากการคาดการณ์ของกรมควบคุมมลพิษในปี 2555 คาดว่าจะมีปริมาณอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 7 ประเภท ได้แก่ โทรทัศน์ เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น คอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ โทรศัพท์มือถือ และกล้องดิจิทัล เกิดขึ้นเกือบ 10 ล้านเครื่อง/ประเภท คิดเป็นน้ำหนักรวมกว่า 1 แสนตัน ซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดต่างๆ ประมาณ 55 ล้านหลอด และถ่านไฟฉายซึ่งส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 90 เป็นถ่านอัลคาไลน์ใช้แล้วทิ้งอีกไม่ต่ำกว่า 7 ล้านก้อนต่อปี โดยปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทุกปีตามแนวโน้มการบริโภคที่เพิ่มสูงขึ้น

2.2 การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย

เมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถูกใช้งานไปแล้ว ทำให้มีการเสื่อมสภาพและหมดอายุการใช้งานลง กลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์อีกทั้งยังมีการลักลอบนำเข้าขยะอิเล็กทรอนิกส์จากต่างประเทศเข้ามายังประเทศไทย ซึ่งประเทศไทยยังขาดการจัดการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเหมาะสมและเป็นระบบ เนื่องจากยังไม่มีระบบการเก็บรวบรวม การเรียกคืนซากผลิตภัณฑ์ การคัดแยก การรีไซเคิล การกำจัด และเทคโนโลยีการจัดการที่เหมาะสม อีกทั้งยังขาดแคลนบุคลากรผู้ชำนาญการ (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) ทำให้ขยะอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ถูกนำไปทิ้งปะปนกับขยะมูลฝอยชุมชน ซึ่งเทศบาลหรือ

กรุงเทพมหานครจะเก็บรวบรวมไปกำจัดโดยการฝังกลบหรือส่งไปยังโรงเผาขยะ ในขณะที่ขยะอิเล็กทรอนิกส์บางส่วนถูกส่งไปยังผู้รับซื้อของเก่าหรือผู้คัดแยก เพื่อทำการคัดแยกโลหะหนักที่มีค่า และวัสดุที่ยังสามารถรีไซเคิลได้ออกมา เพื่อนำไปขายต่อหรือส่งไปยังโรงงานรีไซเคิล และส่วนที่ไม่สามารถขายต่อได้จะนำไปลักลอบทิ้งรวมกับขยะมูลฝอย หรือเผาทำลาย แสดงดังรูปที่ 2.1 จนอาจทำให้เกิดการรั่วไหลของสารพิษสู่แหล่งน้ำ อากาศ และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทั้งในระยะสั้นและระยะยาว



รูปที่ 2.1 การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย
(ที่มา: ดัดแปลงจากกรมควบคุมมลพิษ, 2558)

ปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ถือได้ว่าเป็นปัญหาระดับประเทศที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อมลพิษทางอากาศ มลพิษทางดิน มลพิษทางน้ำ อีกทั้งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพอนามัยของประชาชน จึงทำให้มีการกำหนดยุทธศาสตร์การจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เชิงบูรณาการ ปี พ.ศ.2557 – 2564 ตามกรอบนโยบายการบริหารจัดการซากผลิตภัณฑ์และอิเล็กทรอนิกส์อย่างครบวงจรตั้งแต่ต้นทาง ซึ่งมุ่งเน้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมทัดเทียมระดับสากล จนถึงปลายทาง ซึ่งเน้นการพัฒนากลไกการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์อย่างเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีเป้าหมายหลัก คือ มีระบบการคัดแยกขยะและเก็บรวบรวมซาก

ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) ขนาดใหญ่ กรุงเทพมหานคร นำซากผลิตภัณฑ์ฯ ที่รวบรวมได้ไปบำบัดและกำจัดอย่างถูกต้องโดยผู้ผลิตและผู้นำเข้าอย่างน้อยร้อยละ 5 ของปริมาณการจำหน่ายเฉลี่ยผลิตภัณฑ์ รวมทั้งมีโรงคัดแยกขยะและรีไซเคิลซากผลิตภัณฑ์ฯ อย่างครบวงจรอย่างน้อย 1 แห่ง ภายในปี พ.ศ.2564

อปท. ขนาดใหญ่ เทศบาลนครทุกแห่ง กรุงเทพมหานคร และเมืองพัทยา มีระบบการคัดแยกและเก็บรวบรวมซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 10 ประเภท คือ (1) โทรทัศน์ (2) ตู้เย็น (3) เครื่องปรับอากาศ (4) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (5) โทรศัพท์ (6) หลอดฟลูออเรสเซนต์ (7) กล้องถ่ายภาพ/วิดีโอ (8) เครื่องพิมพ์และเครื่องโทรสาร (9) อุปกรณ์เล่นภาพ/เสียงขนาดพกพา และ (10) แบตเตอรี่แห้ง กำหนดอัตราการรวบรวมซากผลิตภัณฑ์เป้าหมายเฉลี่ยไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของปริมาณซากผลิตภัณฑ์ฯ ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในพื้นที่

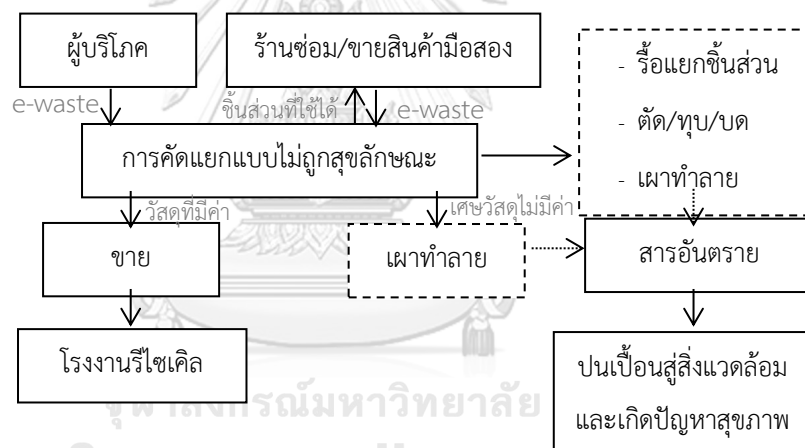
ผู้ผลิตและผู้นำเข้า มีการนำซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ 4 ประเภท คือ (1) หลอดฟลูออเรสเซนต์ (2) แบตเตอรี่แห้ง (3) ตู้เย็น และ (4) โทรทัศน์ ที่รวบรวมได้จากแหล่งกำเนิดต่างๆ หรือจากผู้จำหน่าย หรือ อปท. ไปบำบัดกำจัดอย่างถูกต้องอย่างน้อยร้อยละ 5 ของปริมาณการจำหน่าย รวมทั้งส่งเสริมให้มีโรงงานคัดแยกและรีไซเคิลซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

ปัจจุบันได้มีการดำเนินการวางระบบจัดการของเสียอันตรายจากชุมชน ให้ อปท. มีจุดรวบรวมของเสียอันตรายในชุมชนแล้วส่งมายังศูนย์รวบรวมของเสียอันตรายในระดับจังหวัด และเร่งรัดการออกกฎระเบียบคัดแยกของเสียอันตรายจากชุมชนออกจากขยะทั่วไป รวมถึงจัดทำ (ร่าง) พระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. พร้อมกับเตรียมการรองรับร่างฯ โดย 1) จัดทำคู่มือศูนย์รับคืนซากผลิตภัณฑ์ฯ 2) ออกแบบก่อสร้างศูนย์รับคืนซากผลิตภัณฑ์ฯ 3) จัดทำระบบรองรับการขึ้นทะเบียนศูนย์รับคืนซากผลิตภัณฑ์ฯ 4) จัดทำอนุบัญญัติ 12 ฉบับ 5) จัดทำร่างโครงสร้างและบทบาทหน้าที่ศูนย์ประสานงานและเผยแพร่ความรู้และข้อมูลซากผลิตภัณฑ์ฯ 6) จัดทำข้อมูลความรู้ทางวิชาการความเป็นอันตรายจากการแยกชิ้นส่วนซากผลิตภัณฑ์อย่างไม่ถูกหลักวิชาการ ซึ่งร่างพระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พ.ศ. ได้ผ่านความเห็นชอบจากคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 25 ธันวาคม 2561 ขณะนี้อยู่ระหว่างเสนอร่างฯ ให้สภานิติบัญญัติแห่งชาติพิจารณา (กรมควบคุมมลพิษ, 2558)

2.3 สถานการณ์ปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ระดับท้องถิ่น

ประเทศไทยมีแหล่งชุมชนคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์กระจายอยู่ทั่วประเทศเกือบ 100 แห่งในจังหวัดกระบี่ กาฬสินธุ์ ชลบุรี เชียงราย เชียงใหม่ นครปฐม นนทบุรี บุรีรัมย์ ปทุมธานี ปราจีนบุรี พระนครศรีอยุธยา ราชบุรี ลำพูน สมุทรปราการ สมุทรสาคร สระแก้ว และอำนาจเจริญ โดยมีแหล่ง

คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ใหญ่ที่สุดอยู่ที่อำเภอห้วยซัย จังหวัดกาฬสินธุ์ รองลงมาเป็นพื้นที่อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ และอำเภอพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์ ส่วนในกรุงเทพมหานครมีแหล่งคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่อยู่ที่ซอยเสือใหญ่อุทิศ เขตจตุจักร โดยมีลักษณะการคัดแยกคล้ายกัน คือ กลุ่มผู้ประกอบการรับคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์จะรับซื้อเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ใช้แล้วจากครัวเรือนหรือร้านขายของเก่าแล้วนำมาแกะ ทูบ ถอดแยกชิ้นส่วนที่มีค่าเพื่อนำไปขาย โดยไม่มีการควบคุมหรือป้องกันมลพิษที่เกิดจากสารอันตรายและโลหะหนักในซากผลิตภัณฑ์ฯ นั้น มีการเผาสายไฟและเศษวัสดุไม่มีค่า การตัดเศษเหล็ก การทิ้งเศษวัสดุที่ปนเปื้อนตามแหล่งฝังกลบขยะทั่วไปหรือตามที่รกร้าง รวมทั้งการใช้สารอันตรายในการสกัดแยกโลหะมีค่า ด้วยเหตุนี้พื้นที่ที่มีการคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์จึงมีการสะสมของโลหะหนักและสารอันตรายต่างๆ อาทิ ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม ตลอดจนสารในกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารไดออกซิน และสารฟิวแรน ซึ่งล้วนแต่เป็นสารก่อมะเร็งที่สามารถตกค้างในสภาพแวดล้อมทั้ง อากาศ แหล่งน้ำ และแหล่งดิน อันเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาสุขภาพ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการรื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่ถูกสุขลักษณะ

(ที่มา: ดัดแปลงจาก Thongkaow et al., 2017)

จากการงานวิจัยที่ได้สำรวจปริมาณและประเภทของขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการนำเข้ามาในชุมชนเพื่อทำการรื้อแยก ที่อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ พบว่ามีขยะอิเล็กทรอนิกส์ 12 ประเภท โดยเรียงตามน้ำหนักที่นำเข้าสู่ชุมชนต่อปีต่อบ้านที่ประกอบอาชีพคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ 1 หลัง จากมากไปน้อยได้ดังนี้ โทรทัศน์แบบหลอดรังสีภาพคาโทด (28 ตัน) ตู้เย็น (25.51 ตัน) เครื่องซักผ้า (23.4 ตัน) พัดลม (16.61 ตัน) คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (7.3 ตัน) เครื่องปรับอากาศ (1.56 ตัน) ไมโครเวฟ (1.05 ตัน) หม้อหุงข้าว (0.97 ตัน) เครื่องเล่นดีวีดี/วิดีโอ (0.61 ตัน) เครื่องพิมพ์ (0.219 ตัน) หม้อไฟฟ้า (0.11 ตัน) และเตารีด (0.065 ตัน) (Tongkaow, Prueksasit, & W., 2017) จะเห็นได้ว่าโทรทัศน์แบบหลอดภาพรังสีคาโทดมี

ปริมาณการนำเข้าสู่ชุมชนเพื่อทำการรื้อแยกมากเป็นอันดับ 1 ทำให้งานวิจัยฉบับนี้เลือกศึกษาการปลดปล่อยโลหะหนักจากแต่ละขั้นตอนการคัดแยกซากโทรทัศน์แบบหลอดรังสีภาพคาโทด

2.4 โทรทัศน์แบบหลอดภาพรังสีคาโทด

โทรทัศน์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หนึ่งที่มีนุษย์ให้ความสำคัญมานานหลายสิบปี จากการพัฒนาของเทคโนโลยีทำให้โทรทัศน์มีวิวัฒนาการจากโทรทัศน์ขาวดำ มาเป็นโทรทัศน์สีที่ใช้หลอดภาพรังสีคาโทด (CRT: Cathode Ray Tube) และวิวัฒนาการมาเป็นโทรทัศน์จอพลาสมา (LCD: Liquid Crystal Display) ผู้บริโภคจึงเปลี่ยนมาใช้โทรทัศน์จอพลาสมามากขึ้น เกิดการทิ้งโทรทัศน์สีที่ใช้หลอดภาพรังสีคาโทด (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม, 2551) ส่งผลให้มีปริมาณซากโทรทัศน์แบบหลอดภาพรังสีคาโทดมีการนำเข้ามาในชุมชนเพื่อทำการรื้อแยก ที่อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ สูงถึง 28 ตัน ในปี 2559

2.4.1 ส่วนประกอบของโทรทัศน์แบบหลอดภาพรังสีคาโทด

โทรทัศน์แบบหลอดรังสีภาพคาโทดจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นแก้ว โลหะ และพลาสติกเป็นหลัก ซึ่งสามารถแบ่งสัดส่วนของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบหลักของโทรทัศน์แบบหลอดภาพรังสีคาโทด

ชิ้นส่วน / วัสดุหลัก	สัดส่วนของวัสดุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
หลอดภาพรังสีคาโทด	
ตะกั่วออกไซด์ (Lead Oxide)	5.26 – 6.61
แก้ว	~57
แคดเมียม (Cadmium metal)	0.02 – 0.03
แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Antimony Trioxide)	0.13 – 0.17
แผ่นวงจรพิมพ์	
เตตราโบรมบิสฟีนอล เอ (Tetrabromobisphenol A)	1.68 – 2.09
พลาสติกทั้งหมด	
เตตราโบรมบิสฟีนอล เอ (Tetrabromobisphenol A)	2.09 – 2.22
สายไฟ	1.59 – 5.94
โลหะ	6.06 – 10
ทองแดง	2.33 – 3
อื่นๆ	~5

(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

โทรทัศน์สีจอทึบที่เราใช้ในอดีตมีส่วนประกอบหลักเป็นตู้/โครงโทรทัศน์ซึ่งมักเป็นพลาสติก ส่วนของจอภาพที่ทำจากแก้ว และส่วนของแผ่นวงจรพิมพ์และสายไฟ โดยสามารถจำแนกได้ดังนี้ (ดุสิต เครื่องงาม, 2542)

- 1) ตู้/โครงโทรทัศน์ (Cabinet) ฝาประกอบสำหรับครอบจอแก้ว ส่วนใหญ่ทำจากพลาสติก
- 2) ขั้วคาโทด (Cathode) เป็นส่วนหนึ่งของปืนอิเล็กตรอนและทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งขั้วคาโทดที่ดีจะต้องกำเนิดอิเล็กตรอนที่มีความเข้มสูงและสามารถยิงเป็นลำเล็กได้ดี จึงได้มีการพัฒนาขั้วคาโทดที่มีส่วนประกอบของแผ่นฐานที่ผลิตจากนิกเกิลผสมด้วยแมกนีเซียมหรือซิลิคอน และมีชั้นยิงอิเล็กตรอนเคลือบอยู่ โดยส่วนนี้ผลิตจากออกไซด์ของแบเรียม เมื่อขั้วคาโทดถูกความร้อนจะทำให้แบเรียมถูกปฏิกิริยารีดักชัน แล้วลอยขึ้นมาที่ผิวของคาโทด และทำให้เกิดการยิงอิเล็กตรอนด้วยกระบวนการดังกล่าวทำให้มีการสูญเสียวัสดุแบเรียม ซึ่งจะระเหิดเป็นก๊าซไปเป็นสาเหตุที่ทำให้ขั้วคาโทดเสื่อมคุณภาพ
- 3) ชาโดว์มาร์ค (Shadow Mask) ทำด้วยแผ่นโลหะเหล็กหนา ออกแบบให้ทนต่อความร้อนและไม่บิดเบี้ยว มีการเคลือบด้วยวัสดุที่ระบายความร้อนได้ดี เช่น บิสมัทไตรออกไซด์
- 4) วัสดุเรืองแสง (Phosphor) ถูกเคลือบอยู่เป็นจุดๆ ที่ผิวด้านในของจอภาพหลอดรังสีคาโทดซึ่งมีด้วยกัน 3 สี คือ สีน้ำเงิน ใช้วัสดุ $ZnS:Ag$ สีแดง ใช้วัสดุ $Y_2O_2S:Eu$ และสีเขียว ใช้วัสดุ $ZnS:Au$ วัสดุ Cu หรือ วัสดุ Al ตามปกติวัสดุเรืองแสงมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนค้างอยู่บนผิว จึงมีการใช้ลูมิเนียมฉาบไว้บนผิววัสดุเรืองแสงอีกชั้นหนึ่ง นอกจากนี้การฉาบฟิล์มลูมิเนียมบนผิววัสดุเรืองแสงยังช่วยสะท้อนแสงทำให้ความสว่างของจอภาพหลอดรังสีคาโทดดีขึ้นด้วย
- 5) จอแก้ว (Face Plat) เป็นส่วนที่จะต้องดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการยิงอิเล็กตรอนเข้าสู่จอเรืองแสง จึงต้องผสมตะกั่วเข้าไปในจอแก้ว และเคลือบด้วยวัสดุกันการสะท้อนอีกหลายๆ ชั้น
- 6) แผ่นวงจรพิมพ์ เป็นส่วนควบคุมการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด เช่น สารท่งไฟ ตะกั่ว แคดเมียม และปรอท
- 7) สายไฟ ทำด้วยทองแดงและเคลือบไว้ด้วยพลาสติก ซึ่งหากเผาจะทำให้เกิดไดออกซินและฟิวแรน

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของโทรทัศน์แบบหลอดรังสีภาพคาโทด

ชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง	วัสดุ	สัดส่วนของวัสดุ (ร้อยละของน้ำหนัก)	โลหะหนัก/สารอันตราย
โครงโทรทัศน์	พลาสติก	23	สารหน่วงไฟ
สายไฟ	ทองแดง	3	สารหน่วงไฟ และทองแดง
หลอดภาพรังสีคาโทด	แก้ว	57	ตะกั่วออกไซด์ แคดเมียม และแอนติโมนีไตรออกไซด์
จอแก้ว			พลวง
กรวยแก้ว			พลวง และตะกั่ว
สารเรืองแสงที่ฉาบบนจอแก้ว			ซีลไฟต์ของสังกะสี
อื่น ๆ		17	-

(ที่มา: ดัดแปลงจากกรมอนามัย, 2558)

2.4.2 ขั้นตอนการแยกซากโทรทัศน์แบบหลอดภาพรังสีคาโทด

จากคู่มือการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ กรมควบคุมมลพิษ ได้ระบุวิธีการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ที่ถูกต้องตามหลักวิชาการได้แก่ 1) การแยกชิ้นส่วนลำโพง แผ่นวงจรพิมพ์ ปีนี้อิเล็กตรอน 2) การแยกหลอดภาพรังสีภาพคาโทด และแถบเสริมเหล็ก 3) การรื้อ/แยกชิ้นส่วนหลอดภาพรังสีคาโทด โดยมีความคล้ายกับขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรทัศน์ของผู้ประกอบการรื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ในตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ ที่มีขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การรื้อ/แยกชิ้นส่วน เป็นการแยกส่วนที่เป็นจอแก้วและโครงโทรทัศน์ออกจากกัน จากนั้นแยกชิ้นส่วนแผ่นวงจรพิมพ์ ปีนี้อิเล็กตรอน และสายไฟออก 2) การแยกหลอดภาพรังสีคาโทดและการทุบจอแก้ว ทำโดยใช้เหล็กตัดหลอดภาพรังสีคาโทดออกจากจอแก้ว จากนั้นทุบจอแก้วเพื่อแยกเอากรอบโลหะออก (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2563) ซึ่งในแต่ละขั้นตอนอาจมีการปลดปล่อยสารอันตรายที่แตกต่างกันตามองค์ประกอบของโทรทัศน์ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบหลอดรังสีภาพคาโทด

ขั้นตอนการรื้อแยก	ชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง	โลหะหนัก/สารอันตราย	ปัญหาที่ทำให้ไม่สามารถทำได้ตามหลักวิชาการ
การรื้อ/แยกชิ้นส่วน	โครงโทรทัศน์	สารหน่วงไฟ	- ขาดอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการแยกชิ้นส่วน - ผู้รื้อแยกขาดความเข้าใจของอันตรายของชิ้นส่วนต่างๆ ในโทรทัศน์ - ขาดความร่วมมือจากหน่วยงานที่สามารถนำชิ้นส่วนต่างๆ ของโทรทัศน์ไปรีไซเคิลได้
	แผ่นวงจรพิมพ์	สารหน่วงไฟ เบริลเลียม สารหนู ตะกั่ว และนิกเกิล	
	ปืนอิเล็กทรอนิกส์	แบเรียมออกไซด์	
	สายไฟ	สารหน่วงไฟ และทองแดง	
การแยกหลอดภาพรังสีคาโทด และการทึบจอแก้ว	หลอดภาพ	ตะกั่วออกไซด์ แคดเมียม	- ขาดความร่วมมือจากหน่วยงานที่สามารถนำชิ้นส่วนต่างๆ ของโทรทัศน์ไปรีไซเคิลได้
	รังสีคาโทด	และแอนติโมนีไตรออกไซด์	
	จอแก้ว	พลวง	
	กรวยแก้ว	พลวง และตะกั่ว	
	สารเรืองแสง	ซัลไฟด์ของสังกะสี	

(ที่มา: ดัดแปลงจากกรมควบคุมมลพิษ, 2551)

ตัวอย่างงานวิจัยที่ทำการเก็บตัวอย่างระหว่างการคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ในขั้นตอนต่างๆ เช่น งานวิจัยของ Brigden (2005) ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนัก 20 ชนิด ขณะทำกิจกรรม 6 กิจกรรม ได้แก่ การคัดแยกพลาสติก การบัดกรี การย่อยด้วยเครื่องจักร การสกัดด้วยกรด การเผา และการจัดเก็บหลอดภาพรังสีคาโทด จากโรงงานรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศจีน (เมือง Guiyu จังหวัด Guangdong) และอินเดีย (ด้านตะวันออกของเมือง Delhi) โดยเก็บตัวอย่างโลหะหนักในฝุ่น ดิน และน้ำใต้ดินจากบริเวณต่าง ๆ ของโรงงาน พบว่ามีสารหนูในทุกกิจกรรม เฉพาะที่พบในอนุภาคฝุ่นในบรรยากาศ ซึ่งกิจกรรมที่ทำให้พบสารหนูมากที่สุดคือ การจัดเก็บหลอดรังสีภาพคาโทด (47.0 mg/kg) รองลงมาคือ การบัดกรี (33.3 mg/kg) และการเผา (32.0 mg/kg) และยังมีโลหะหนักชนิดอื่น ๆ อีกมาก โดยเฉพาะตะกั่วที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ทำให้มีความตระหนักว่าจะเกิดผลกระทบต่อคนงานและผู้พักอาศัยในพื้นที่ใกล้เคียงกับโรงงานแห่งนี้

ในส่วนของงานวิจัยของ Xue, Yang, Ruan, and Xu (2012) ได้ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในขั้นตอนการรีไซเคิลแผ่นวงจรพิมพ์ โดยได้ตรวจสอบและควบคุมการปนเปื้อนของสิ่งแวดล้อมในรูปแบบของโลหะหนัก ได้แก่ โครเมียม ทองแดง แคดเมียม และตะกั่วในบรรยากาศ ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักใน TSP มีค่า ทองแดง โครเมียม และแคดเมียม เท่ากับ 1.22, 0.17 และ 0.028 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{10} มีค่า

ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และแคดเมียม เท่ากับ 0.88, 0.56, 0.12 และ 0.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ซึ่งโครเมียมและตะกั่ว สามารถปลดปล่อยสู่บรรยากาศได้ในปริมาณที่มากขึ้นหากมีการบดหรือมีการแยกชิ้นส่วน

งานวิจัยของ J. Deng et al. (2014) ได้ทำการศึกษาในโรงงานรีไซเคิลโทรทัศน์ทางตอนใต้ของประเทศไทย โดยได้กำหนดจุดเก็บตัวอย่างส่วนประกอบของโทรทัศน์ที่บดละเอียด และตัวอย่างอนุภาคฝุ่นในบริเวณที่มีการแยกชิ้นส่วนโทรทัศน์เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) Tetrabromobisphenol (TBBPA) และโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม และนิกเกิล พบว่าความเข้มข้นของ PBDEs สูงที่สุดในขั้นตอนการรีไซเคิลสายไฟมีค่า 722,000 ng/g ตามด้วยขั้นตอนการคัดแยกด้วยมือมีค่า 117 $\mu\text{g}/\text{g}$ ในส่วนความเข้มข้นของ TBBPA สูงสุดในขั้นตอนการคัดแยกด้วยมือมีค่า 557 ng/g รองลงมาเป็นขั้นตอนการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์มีค่า 428 ng/g สำหรับความเข้มข้นของโลหะหนักจากตัวอย่างฝุ่นมีค่าตะกั่ว และทองแดง อยู่ที่ 22,900 mg/kg และ 42,700 mg/kg ตามลำดับ

2.5 ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor)

ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณสารมลพิษที่ปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยสารมลพิษนั้น ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษมักแสดงในรูปของค่าน้ำหนักของสารมลพิษต่อหน่วยน้ำหนัก ระยะทาง หรือระยะเวลาของกิจกรรมที่ปลดปล่อยสารมลพิษนั้นๆ ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษสามารถนำไปใช้ในประเมินการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ได้ โดยส่วนใหญ่ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษเป็นค่าที่ได้มาในรูปของค่าเฉลี่ยจากข้อมูลที่รวบรวมและศึกษาด้วยวิธีการที่น่าเชื่อถือจึงถือได้ว่าเป็นตัวแทนค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยมลพิษจากแหล่งที่มานั้นๆ ที่สามารถใช้ในระยะยาวได้ (U.S. EPA, 2017) ทั้งนี้สมการทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณการปลดปล่อยมลพิษ คือ

$$E = A \times EF \times (1 - ER / 100)$$

เมื่อ	E (Emission)	= ปริมาณการปลดปล่อย
	A (Activity)	= จำนวนกิจกรรมที่เกิดขึ้น
	EF (Emission factor)	= ค่าตัวคูณมลพิษต่อกิจกรรม
	ER (Emission Reduction)	= ประสิทธิภาพการลดการปลดปล่อยทั้งหมด, ร้อยละ (%)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษจากกิจกรรมการคัดหรือรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์มีน้อยมาก มีผลการศึกษาวิจัยในต่างประเทศของ Brian Gullett (2007) ที่ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และเฝ้าที่หลีกเลี่ยงจากการสร้างเตาเผาจำลอง ในการเผา

แผ่นวงจรพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์และสายไฟที่มีฉนวนหุ้ม โดยพบว่าปริมาณเฉลี่ยของการปลดปล่อยสาร dibenzodioxins polychlorinated และ dibenzofurans (PCDD / PCDFs) มีค่าเท่ากับ 92 ngTEQ/kg และ 11,900 ng TEQ / kg ของมวลแผ่นวงจรพิมพ์และสายไฟที่มีฉนวนหุ้ม ตามลำดับ ซึ่งค่าสำหรับสายไฟที่มีฉนวนหุ้มนั้นสูงกว่าค่าการเผาไหม้ขยะทั่วไปในประเทศถึง 100 เท่า ส่วนความเข้มข้นของการปล่อยของ PBDD / PBDFs จากการเผาไหม้ของแผ่นวงจรพิมพ์สูงกว่าไม่เผาไหม้ถึง 100 เท่า และจากการสู่มตัวอย่างอนุภาคแขวนลอย (PM) ของเถ้าลอยจากการเผาพบว่า มีค่าการปลดปล่อยประมาณ 15 และ 17g / Kg ของมวลแผ่นวงจรพิมพ์และสายไฟที่มีฉนวนหุ้มตามลำดับซึ่งตัวอย่างเถ้าลอยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองประเภทมีองค์ประกอบโลหะและฮาโลเจนจำนวนมาก ทำให้มีความเข้มข้นของสารตะกั่วมากกว่า 200 เท่าของข้อกำหนดในสหรัฐอเมริกา ซึ่งให้เห็นว่าการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นก่อให้เกิดของเสียอันตราย

2.6 ฝุ่นละออง (Particulate matter)

ฝุ่นละอองที่มีอยู่ในบรรยากาศ มีขนาดตั้งแต่ 0.002 ไมครอน ไปจนถึงขนาดใหญ่กว่า 500 ไมครอน ซึ่งเป็นฝุ่นทรายขนาดใหญ่ สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ฝุ่นละอองเป็นสารที่มีความหลากหลายทางด้านกายภาพและองค์ประกอบ อาจมีสภาพเป็นของแข็งหรือของเหลวแขวนลอย อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมักจะเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็ก (ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 ไมครอน) เนื่องจาก มีความเร็วในการตกตัวต่ำ หากมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น การไหลเวียนของอากาศ กระแสลม เป็นต้น จะทำให้แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมากขึ้น ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 ไมครอน) อาจแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้เพียง 2-3 นาที แต่ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมครอน อาจแขวนอยู่ในอากาศได้นาน ปะปนในอากาศที่มนุษย์หายใจเข้าไปและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.6.1 อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดต่ำกว่า 10 ไมโครเมตร (PM₁₀)

ฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 ไมครอน อาจเป็นอนุภาคของแข็งและกึ่งของแข็งขนาดเล็ก ได้แก่ ฝุ่น (Dust) ควีน (Smoke) ฟุม (Fume) และเขม่า (Soot) ประกอบด้วยมลสารหลายชนิด และมีองค์ประกอบ ของธาตุที่ติดอยู่ในฝุ่นต่างกัน โดยมีแหล่งกำเนิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเผาในที่โล่ง กระบวนการอุตสาหกรรม การบด การโม่ หรือการทำให้เป็นผงจากการก่อสร้าง หากได้รับ PM₁₀ ในปริมาณมากหรือระยะเวลาานาน อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เนื่องจากเมื่อหายใจเข้าไปสามารถเข้าไปสะสมในระบบทางเดินหายใจ ซึ่งมีมาตรฐานคุณภาพอากาศของ PM₁₀ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศของ PM₁₀ และ PM_{2.5}

มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น	ค่ามาตรฐาน PM ₁₀	ค่ามาตรฐาน PM _{2.5}	แหล่งที่มา
บรรยากาศทั่วไป	24 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.12 mg/m ³	ไม่เกิน 0.05 mg/m ³	กรมควบคุมมลพิษ, 2552
	1 ปี	ไม่เกิน 0.05 mg/m ³	ไม่เกิน 0.025 mg/m ³	
	24 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.05 mg/m ³	ไม่เกิน 0.35 mg/m ³	WHO AQGs, 2005
	1 ปี	ไม่เกิน 0.02 mg/m ³	ไม่เกิน 0.15 mg/m ³	
บรรยากาศในการทำงาน	8 ชั่วโมง	ไม่เกิน 15 mg/m ³	ไม่เกิน 5 mg/m ³	OSHA, 1994
	8 ชั่วโมง	ไม่เกิน 10 mg/m ³	ไม่เกิน 5 mg/m ³	ACGIH, 1994

2.6.2 อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM_{2.5})

ฝุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน อาจเกิดจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น การเผาไหม้ทั้งจากยานพาหนะ การเผาวัสดุการเกษตร ไฟป่า และกระบวนการอุตสาหกรรม เป็นต้น หรืออาจเกิดจากการรวมตัวของก๊าซและมลพิษอื่นๆ ในบรรยากาศ โดยเฉพาะซัลเฟอร์ไดออกไซด์และออกไซด์ของไนโตรเจน รวมทั้งสารพิษอื่นๆ ที่ล้วนเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ เช่น สารปรอท แคดเมียม สารหนู หรือโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน อีกทั้งจาก PM_{2.5} สามารถลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศได้เป็นเวลานานและปะปนกับมลพิษอื่นๆ ในอากาศ หากได้สูดดมเข้าไป PM_{2.5} สามารถแพร่กระจายเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ถึงถุงลมในปอด และผ่านเข้าสู่กระแสเลือดไปยังอวัยวะต่างๆ ได้ เพิ่มความเสี่ยงต่อการเป็นโรคในระบบทางเดินหายใจ และโรคปอดต่างๆ หากได้รับในปริมาณมาก หรือเป็นเวลานานจะสะสมในอวัยวะต่างๆ เป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งได้ ซึ่งมีมาตรฐานคุณภาพอากาศของ PM_{2.5} แสดงดังตารางที่ 2.4

2.6.3 อันตรายจากการสัมผัสฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้ เมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจจะเกาะตัวหรือตกตัวได้ในส่วนต่าง ๆ ของระบบทางเดินหายใจ ก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำลายเนื้อเยื่อของอวัยวะนั้น ๆ และถ้าหากมีองค์ประกอบของสารอันตรายในฝุ่น เช่น โลหะหนัก กรด สารอินทรีย์ สามารถเข้าสู่กระแสเลือดได้ ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การได้รับสัมผัสฝุ่นละอองขนาดเล็กเป็นระยะเวลานานๆ ก็จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อปอดและหัวใจ รวมถึงเกิดการระคายเคืองต่อดวงตา จมูก และหลอดลม (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

การรับสัมผัสฝุ่นละอองขนาดเล็กในระยะเวลายาว เช่น การรับสัมผัสในช่วงวัน หรือไม่กี่ ชั่วโมง อาจมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ หายใจติดขัด ไอ จาม มีน้ำมูก และในคนที่มีความอ่อนไหว ต่อการรับสัมผัส เช่น เด็ก คนชรา อาจมีผลกระทบมากกว่าคนในกลุ่มอื่น (U.S. EPA, 2001)

2.7 โลหะหนักที่ถูกปลดปล่อยจากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์

การสะสมของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมมีด้วยกันหลายรูปแบบ ตั้งแต่รูปแบบที่สามารถปลดปล่อย ออกมาได้ง่าย และเข้าไปสะสมอยู่ในตะกอนหรืออยู่ในสิ่งมีชีวิต โลหะหนักสามารถถูกปลดปล่อยสู่อากาศโดยจะเกาะติดอยู่กับอนุภาคของฝุ่นละอองซึ่งจากการทบทวนขั้นตอนในการรีไซเคิลซาก โทรทัศน์ นำมาสู่การเลือกศึกษาโลหะหนัก 11 ชนิด ที่มีโอกาสปล่อยออกสู่บรรยากาศระหว่างการ รีไซเคิลซากโทรทัศน์ และโลหะแต่ละชนิดเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ดังตารางที่ 2.5

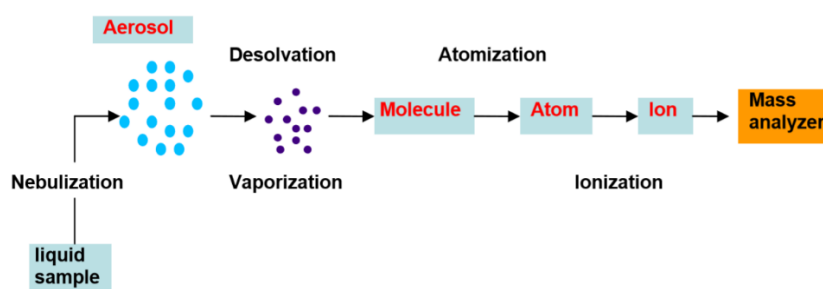
ตารางที่ 2.5 โลหะหนักที่ถูกปลดปล่อยจากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์

โลหะหนัก	ชิ้นส่วน	ผลกระทบต่อสุขภาพ
สารหนู(As)	แผ่นวงจรพิมพ์	เป็นผลรุนแรงต่อระบบหายใจ และเกิดพิษแบบ systemic หากสะสมในระยะยาวจะส่งผลกระทบต่อระบบผิวหนัง
แบเรียม (Ba)	แผ่นหน้าของหลอดภาพ รังสีคาโทด	ไม่มีพิษเฉียบพลันเมื่อสูดดมเข้าไป แต่ในระยะยาวจะสะสมที่ กระดูก และมีผลต่อสมอง ทำให้สมองบวมกล้ามเนื้ออ่อนล้า ทำลายหัวใจ ตับและม้าม
เบริลเลียม (Be)	แผ่นวงจรพิมพ์ และ สายไฟ	เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์โดยเฉพาะ มะเร็งปอด หากสัมผัสจะทำให้เกิดแผลที่ผิวหนังอย่างรุนแรง สารนี้ก่อให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อเมือกในระบบทางเดินหายใจ ก่อให้เกิดอาการไอ หายใจลำบาก เป็นไข้ทำให้เกิดโรคปอดอักเสบ ทำให้ระบบการทำงานของต่อมไทรอยด์และต่อมไร้ท่อผิดปกติสามารถสะสมในน้ำนม กระแสเลือดและสามารถถ่ายทอดในห่วงโซ่อาหารได้
แคดเมียม (Cd)	แผ่นวงจรพิมพ์ และ หลอดภาพรังสีคาโทด	สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมและมีความเป็นพิษสูง พิษเฉียบพลัน เกิดจากการสูดไอของโลหะแคดเมียมเข้าไป ทำให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ ในระยะยาวแคดเมียมจะไปสะสมที่กระดูก

โลหะหนัก	ชิ้นส่วน	ผลกระทบต่อสุขภาพ
โครเมียม (Cr)	ผสมกับโลหะทำให้เกิดความแข็งแรงมีความเหนียวทนทาน	การสูดหายใจเอาฝุ่นละออง หรือควันของกรดโครมิกจะทำให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ โครเมียมเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกเปลี่ยนเป็น trivalent chromium ซึ่งสามารถจับกับโปรตีนส่งผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย สารประกอบเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (hexavalent chromium, Cr(VI)) ทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้ DNA เสียหาย การได้รับสารเฮกซะวาเลนต์โครเมียม จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่ผิวหนัง เป็นโรคเดินหายใจ
ทองแดง (Cu)	ส่วนประกอบและลวดในสายไฟ	มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน อักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อท้องเสีย หัวใจทำงานผิดปกติ และหากสะสมปริมาณทำให้เกิดอาการสั้นตลอดเวลา
แมงกานีส (Mn)	ส่วนประกอบของเหล็กกล้า	มีพิษร้ายแรงต่อระบบประสาทส่วนกลาง ส่งผลให้ปวดหัว นอนไม่หลับ เวียนศีรษะ ไอ เป็นหวัด เป็นโรคหลอดเลือดอักเสบ และสูญเสียความทรงจำ
นิกเกิล (Ni)	ส่วนประกอบของแผ่นวงจรพิมพ์	ทำให้เกิดโรคมะเร็งปอด และอาจมีผลต่อระบบสืบพันธุ์ด้วยและผลเรื้อรัง ได้แก่ มีอาการคล้ายเป็นหอบหืด และแน่นหน้าอก
ตะกั่ว (Pb)	ส่วนประกอบในการบัดกรีแผ่นวงจรพิมพ์ หลอดภาพรังสีแคโทด และแบตเตอรี่	มีความเป็นพิษสูงต่อคนและสัตว์ การได้รับพิษตะกั่วเรื้อรังจะส่งผลต่อระบบประสาทส่วนกลางและสมอง นอกจากนี้ยังส่งผลต่อระบบประสาทส่วนปลายและกล้ามเนื้อระบบทางเดินอาหาร ระบบโลหิตระบบทางเดินปัสสาวะ ระบบโครงสร้าง โดยตะกั่วจะไปสะสมที่กระดูกระบบสืบพันธุ์
พลวง (Sb)	แผ่นวงจรพิมพ์ หลอดภาพรังสีแคโทด จอแก้ว แล้วกรวยแก้ว	มีพิษเฉียบพลันทำให้เกิดการระคายเคืองต่อกระเพาะอาหารลำไส้ คลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วง พิษเรื้อรังจะมีอาการอ่อนเพลีย เบื่ออาหารคลื่นไส้ ระบบทางเดินอาหารผิดปกติตับอาจถูกทำลาย นอกจากนี้ยังมีอาการทางผิวหนัง ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของผิวหนัง ทำให้หนังด้านอาการรุนแรงอาจจะเป็นสาเหตุของมะเร็งที่ผิวหนัง
สังกะสี (Zn)	จอโทรทัศน์แบบ หลอดภาพรังสีแคโทด แผ่นวงจรพิมพ์ และสารเรืองแสง	ก่อให้เกิดอาการอ่อนเพลีย วิงเวียนศีรษะ และอาการท้องร่วง หากได้รับไอฝุ่นของ Zn เข้าร่างกายเป็นเวลานานและปริมาณมากจะเกิดอาการไข้ที่เรียกว่า Zinc chills ซึ่งมีอาการจับไข้หนาวสั่น ปวดกล้ามเนื้อ และอาเจียน

2.8 หลักการทำงานของ Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS)

Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) ประกอบด้วยการทำงาน 2 ส่วน คือ ส่วนของ Inductively coupled plasma (ICP) เป็นแหล่งกำเนิดการกระตุ้นอุณหภูมิสูง ที่ก่อให้เกิดกระบวนการกำจัดตัวทำละลายออกจากสารละลายตัวอย่าง และระเหยสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปไอ ซึ่งไอของโมเลกุลเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นอะตอม และแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งไอออนนี้จะถูกแยกและวัดด้วยส่วนที่สอง คือ ส่วนของ mass spectrometry (MS) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่าง



รูปที่ 2.3 การทำงานของ Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS)

(ที่มา: ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2552)

2.9 การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Health Risk Assessment)

U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) เป็นหน่วยงานหลักที่กำหนดแนวทางการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ ผลจากการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพมีส่วนช่วยตัดสินใจสำหรับการแก้ไขและลดผลกระทบของปัญหาด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม รวมถึงกำหนดทางเลือกในการป้องกันผลกระทบ

การวิเคราะห์โอกาสเกิดความเสี่ยงด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมที่มาจากสารเคมีที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งกำเนิดของสารมลพิษผ่านทางหายใจ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (U.S. EPA, 2009) ได้แก่

2.9.1 การระบุความเป็นอันตรายของสาร (Hazard Identification)

ขั้นตอนการบ่งชี้ความเป็นอันตราย โดยเริ่มจากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อระบุชนิดของสารเคมีที่เกิดขึ้นจากทำกิจกรรมที่จะทำการศึกษาที่สามารถเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ ซึ่งอาจใช้การศึกษาทางด้านระบาดวิทยาและพิษวิทยาในการชี้ให้เห็นถึงอันตรายต่อสุขภาพเมื่อได้สูดดมสารเคมีและในกรณีที่ไม่มีพบว่าสารเคมีที่กำลังศึกษาอยู่นั้นทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์การประเมินความเสี่ยงจะหยุดเพียงแค่ขั้นตอนการระบุความเป็นอันตรายของสารเท่านั้น (ทรรศนีย์ พฤกษาสีทธิ, 2557)

2.9.2 การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณที่ได้รับ (Dose-response Assessment)

ขั้นตอนรวบรวมข้อมูลการรับสัมผัสจาก dose-response relationship ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ได้สัมผัสทางการหายใจและความรุนแรงของความเป็นพิษทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่มีต่อสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการทดลองหรือมนุษย์ลักษณะของ dose-response relationship ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่สูดดม และสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการทดลอง

การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณสารที่ได้รับสัมผัสสามารถใช้ค่า RfD (Reference Dose) คือ ปริมาณสารสูงสุดที่ร่างกายได้รับแล้วไม่แสดงอาการผิดปกติ หรือ RfC (Reference Concentration) ขึ้นอยู่กับสารแต่ละชนิด สามารถอ้างอิงค่า RfD หรือ RfC ได้จาก U.S. EPA

2.9.3 การประเมินการรับสัมผัส (Exposure Assessment)

ขั้นตอนการตรวจวัดและประเมินการได้รับสัมผัสสารผ่านการหายใจของบุคคลวิเคราะห์จากการทำงาน ช่วงเวลาการรับสัมผัส ความถี่ และระยะเวลาการรับสัมผัสสารเคมี หากไม่ได้สัมผัสสารเคมี หมายความว่าไม่มีความเสี่ยงต่อสารเคมีนั้น แต่หากได้รับสัมผัสสารเคมีสามารถตรวจวัดได้โดยตรง แต่ส่วนใหญ่ใช้วิธีการตรวจวัดความเข้มข้นของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม แล้วจึงนำประเมินเป็นการได้รับสัมผัสในมนุษย์ รวมไปถึงการใช้แบบสอบถามเพื่อให้ได้ข้อมูลในการประเมิน

เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณเพื่อให้สามารถอธิบายการรับสัมผัสสารทางการหายใจ โดยแบ่งข้อมูลตามชนิดของสารออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารไม่ก่อมะเร็งและสารก่อมะเร็งเพื่อให้เกิดความจำเพาะต่อการประเมินการรับสัมผัสในการศึกษาจริงมากยิ่งขึ้น ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

$$EC = C \times CF \times ET \times EF \times ED / AT \quad (2.1)$$

$$CDI = (C \times CF \times IR \times ET \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (2.2)$$

เมื่อ EC และ CDI = ปริมาณสารเฉลี่ยที่ได้รับสัมผัสในแต่ละวัน (mg/kg.day)

C = ความเข้มข้นของการรับสัมผัส ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

EF = ความถี่ในการรับสัมผัส (day/years)

ED = ระยะเวลาในการรับสัมผัส (years)

CF = Conversion factor (mg/ μg)

ET = เวลาในการรับสัมผัส (hrs/day)

IR = อัตราการหายใจ (m^3/hrs)

BW = น้ำหนักตัว (kg)

AT = ระยะเวลาเฉลี่ยที่ได้รับสัมผัสสาร (day)

2.9.4 การระบุค่าความเสี่ยง (Risk Characterization)

ขั้นตอนการสรุปผลที่ได้จากข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เพื่อประเมินว่าประชากรมีความเสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบเชิงลบจากการสูดดมสารเคมีหรือไม่ พร้อมทั้งให้ข้อมูลวิธีการประเมินที่อาจมีความไม่แน่นอนของการศึกษา ในทางปฏิบัติ ข้อมูลที่ได้จากการประเมินในแต่ละขั้นตอนอาจมาจากกลุ่มตัวอย่างบางกลุ่มเท่านั้น แต่ก็สามารถนำมาวิเคราะห์ให้ได้ข้อมูลการประเมินความเสี่ยงในภาพรวมบนพื้นฐานของความไม่แน่นอนของข้อมูล สามารถแบ่งข้อมูลตามชนิดของสารออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) สารไม่ก่อมะเร็ง เป็นสารที่ทำให้ร่างกายแสดงอาการผิดปกติ เมื่อได้รับสารแบบมีขีดเริ่ม สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.3

$$HQ = EC / Rfc \quad (2.3)$$

เมื่อ

HQ = Hazard Quotient

EC = ปริมาณสารเฉลี่ยที่ได้รับสัมผัสในแต่ละวัน (mg/kg.day)

Rfc = ปริมาณสารที่ร่างกายสามารถรับได้ในแต่ละวัน (mg/kg.day)

ค่า HQ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณสารใดสารหนึ่งจากเส้นทางการรับสัมผัสเส้นทางใดเส้นทางหนึ่ง ถ้ามีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า มีความเสี่ยงต่อสุขภาพ แต่หากสารที่ได้รับมีหลายชนิดหรือมาจากหลายเส้นทาง สามารถใช้ค่า Hazard Index (HI) เพื่อแสดงค่าความเสี่ยงโดยรวม ดังสมการที่ 2.4

$$HI = \sum HQ \quad (2.4)$$

2) สารก่อมะเร็งเป็นสารที่ทำให้ร่างกายแสดงอาการผิดปกติ เมื่อได้รับสารแบบไม่มีขีดเริ่ม จึงใช้การคำนวณจาก Slope factor (SF) เพื่อประเมินความเสี่ยงของสารก่อมะเร็ง ดังสมการที่ 2.5

$$\text{Lifetime cancer risk} = CDI \times SF \quad (2.5)$$

เมื่อ

Cancer risk = ค่าความเสี่ยงของสารก่อมะเร็ง

CDI = ปริมาณสารเฉลี่ยที่ได้รับสัมผัสในแต่ละวัน (mg/kg.day)

SF = Slope factor (mg/kg.day)⁻¹

ในกรณีที่ค่า Cancer risk มีค่าระหว่าง 1×10^{-6} - 1×10^{-4} สามารถยอมรับได้ว่าอยู่ในช่วงที่ไม่เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสสาร โดยถือว่าค่า 1×10^{-4} เป็นขอบบนสุดของการเกณฑ์ในการตัดสินใจดำเนินการลดความเสี่ยง (U.S. EPA, 1991)จากนั้นสามารถคำนวณค่าผลรวมของความเสี่ยงที่คนงานได้รับสัมผัสสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้จากสมการที่ 2.6

$$\text{Total cancer risk} = \sum \text{Lifetime cancer risk} \quad (2.6)$$

มีงานวิจัยในต่างประเทศจำนวนไม่น้อยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยงในบุคคลที่คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของงานวิจัยของ Xue et al. (2012) ได้ทำการประเมินความเสี่ยงในขั้นตอนการรีไซเคิลแผ่นวงจรพิมพ์ เมื่อทำการประเมินความเสี่ยงสุขภาพของโลหะหนักที่ไม่ก่อมะเร็งพบว่า ค่า HI ของตะกั่วมีค่า 1.45 ในขณะที่ค่า Cancer risk ของโลหะก่อมะเร็งพบว่า โครเมียม และแคดเมียม มีค่าเท่ากับ 3.29×10^{-8} และ 1.61×10^{-9} ตามลำดับถือว่าอยู่ในเกณฑ์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ซึ่งกำหนดไว้ที่ค่าน้อยกว่า 10^{-6}

งานวิจัยของ Song et al. (2015) ทำการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของคนงานที่ได้รับสัมผัสโลหะหนักในโรงงานคัดแยกซากโทรศัพท์มือถือจาก 2 กิจกรรมคือ การคัดแยกหลอดภาพรังสีคาโทด และแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้ compatible high-volume air sampler ในการเก็บอย่าง TSP ที่อัตราการไหล 1 - 1.2 m³/min เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สกัดตัวอย่างตามวิธี U.S. EPA และวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วย Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES) การคัดแยกหลอดภาพรังสีคาโทดพบว่า ความเข้มข้นของ TSP ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง มีค่าเท่ากับ 246.5, 2.3, 0.036 และ 1.25 µg/m³ ตามลำดับ ส่วนการคัดแยกแผ่นวงจรพิมพ์ พบว่าความเข้มข้นของ TSP ตะกั่วปรอท แคดเมียม และ ทองแดง มีค่าเท่ากับ 650.7, 1.2, 0.015, 0.024, และ 1.48 µg/m³ ตามลำดับ เมื่อนำมาประเมินความเสี่ยงของสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งพบว่าตะกั่ว มีค่า HI เกินค่าที่ยอมรับได้ (มากกว่า 1) ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพ

นอกจากนี้ มีงานวิจัยของ Ruan, Hu, Xu, and Zhang (2016) ที่ได้เก็บตัวอย่าง TSP, PM₁₀ และ PM_{2.5} ภายในโรงงานรีไซเคิลซากโทรศัพท์มือถือที่มีการรีไซเคิลด้วยมือ และบริเวณที่มีการรีไซเคิลแบบกึ่งอัตโนมัติ ก่อนจะนำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ เหล็ก สังกะสี แบเรียม และตะกั่ว เนื่องจากสังกะสีและตะกั่วถือเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษจึงถูกนำไปประเมินความเสี่ยงสุขภาพของสารไม่ก่อมะเร็ง พบค่า HQ ของสังกะสีบริเวณการรีไซเคิลด้วยมือ และการรีไซเคิลแบบกึ่งอัตโนมัติมีค่าเท่ากับ 5.58×10^{-5} และ 3.26×10^{-5} ตามลำดับ ในขณะที่ค่า

HQ ของตะกั่วทั้ง 2 บริเวณมีค่าเท่ากับ 6.34×10^{-3} และ 4.01×10^{-3} ตามลำดับ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ซึ่งกำหนดไว้ที่ค่าน้อยกว่า 1

สำหรับงานวิจัยในพื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์ได้มีการประเมินความเสี่ยงสุขภาพจากการรับสัมผัสโลหะหนักผ่านทางหายใจของแรงงานที่คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ ในพื้นที่ตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ โดยงานวิจัยของPuangprasert and Prueksasit (2019) ได้ทำการศึกษาโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และตะกั่ว ผลการประเมินความเสี่ยงสุขภาพของโลหะหนักที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งพบว่า แคดเมียม ทองแดง และนิกเกิล มีค่า 95% Confidence level ของ HQ เท่ากับ 0.0670 – 0.1675, 0.0118 – 0.0177 และ 0.3334 – 0.9126 ตามลำดับ ซึ่ง HQ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการรับสัมผัสโลหะหนักกลุ่มนี้ยังไม่พบโอกาสการเพิ่มความเสี่ยงของการเกิดโรคอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสำหรับโลหะหนักที่ก่อให้เกิดมะเร็งพบว่า แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว มีค่า 95% Confidence level ของ Cancer risk เท่ากับ 7.55×10^{-5} – 1.86×10^{-4} , 1.69×10^{-5} – 4.66×10^{-5} และ 3.26×10^{-7} – 9.66×10^{-7} ตามลำดับ ซึ่งความเสี่ยงจากการรับสัมผัสแคดเมียมและนิกเกิลเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (10^{-6}) แสดงถึงจากระยะการทำงานในลักษณะดังกล่าวคนงานมี โอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง

ในส่วนงานวิจัยของคณานต์ โภญจนวรรณ และ ณิชารีย์ สารพันธุ์ (2559) ได้มีการประเมินความเสี่ยงสุขภาพของบุคคลที่คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ผ่านทางหายใจ และสัมผัสทางผิวหนัง ของคนงานในพื้นที่เดียวกันกับงานวิจัยก่อนหน้า โดยศึกษาโลหะหนัก 2 ชนิด ได้แก่ สารหนู และปรอท พบว่าผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารไม่ก่อมะเร็ง ได้แก่ ปรอทในอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนและไอปรอทที่สัมผัสทางการหายใจ และการสัมผัสปรอทและสารหนูทางผิวหนังพบว่าค่า 95% Confidence level ของค่า Hazard quotients (HQ) อยู่ในช่วง 1.89×10^{-3} – 3.60×10^{-3} , 6.93×10^{-3} – 2.78×10^{-2} , 2.22×10^{-4} – 2.50×10^{-4} และ 7.56×10^{-13} – 1.53×10^{-12} ตามลำดับ ซึ่ง HQ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการรับสัมผัสโลหะหนักในกลุ่มนี้ยังไม่พบโอกาสที่จะเพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพ สำหรับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารก่อเกิดมะเร็ง สามารถประเมินได้เฉพาะข้อมูลการรับสารหนูในฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนผ่านทางผิวหนัง ค่า 95% CI ของค่า Lifetime cancer risk เท่ากับ 1.10×10^{-8} – 2.27×10^{-8} ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ซึ่งกำหนดไว้ที่ค่าน้อยกว่า 10^{-6}

บทที่ 3 วิธีดำเนินการ

3.1 พื้นที่ศึกษา

3.1.1 การกำหนดพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา คือ พื้นที่ตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ ดังรูปที่ 3.1 จากข้อมูลของโรงพยาบาลส่งเสริมตำบลบ้านเป่าพัฒนาในปี 2562 พบว่า ในพื้นที่องค์การบริหารส่วนตำบลแดงใหญ่มีผู้ประกอบการอาชีพรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 105 คริวเรือน การเลือกพื้นที่ศึกษานี้ในการเก็บตัวอย่าง $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ เนื่องจากเป็นชุมชนที่มีการประกอบกิจการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์หลายหลังคาเรือน อีกทั้งยังไม่เคยมีการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้บน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากแต่ละขั้นตอนของการรีไซเคิลซากโทรศัพท์



รูปที่ 3.1 คริวเรือนที่ประกอบอาชีพรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์
ในพื้นที่ตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์

3.1.2 รูปแบบการเก็บตัวอย่าง

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นเก็บตัวอย่าง PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์เท่านั้น จึงเก็บตัวอย่างภายใน chamber ดังรูปที่ 3.2 และทำความสะอาดก่อนเก็บตัวอย่างทุกครั้ง เพื่อปรับให้อากาศภายใน chamber ไม่มีอนุภาคจากข้างนอกปนเปื้อนโดยการเช็ดและดูดเศษที่เหลือจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตัวอย่างก่อนหน้าออกด้วยเครื่องดูดฝุ่น จากนั้นนำตัวอย่างซากโทรทัศน์ตัวอย่างถัดไปใส่ลงใน chamber แล้วปิด และดูดฝุ่นออกจาก chamber จนกว่าจะมีค่าอนุภาคต่ำกว่าค่าที่ได้มีการวัดไว้ก่อนการเก็บตัวอย่างในครั้งแรก ซึ่งการเก็บตัวอย่างนั้นเป็นไปตามรูปแบบการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบไม่ถูกสุลักษณะ จึงไม่มีการทำความสะอาดโทรทัศน์ก่อนการเก็บตัวอย่าง แต่ทำการบันทึกข้อมูลลักษณะอนุภาคที่เกาะบนโทรทัศน์เพื่อเป็นข้อมูลในการอภิปรายผล โดยแบ่งตัวอย่างโทรทัศน์เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ โทรทัศน์ขนาดเล็ก (ขนาด 14 นิ้ว) และโทรทัศน์ขนาดใหญ่ (ขนาด 21 นิ้ว) โดยการเก็บตัวอย่างแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ

รูปแบบที่ 1 เก็บตัวอย่างอนุภาคทั้ง 2 ขนาดตลอดการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 เครื่อง แล้วเก็บตัวอย่างต่อไปจนมีเวลาในการเก็บตัวอย่างครบ 60 นาที ภายใน Chamber ขนาด 0.6 ลูกบาศก์เมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์การปลดปล่อยโลหะหนัก และการรับสัมผัสโลหะหนักทางการหายใจจากซากโทรทัศน์ 1 เครื่อง ทำการเก็บตัวอย่างโดยใช้โทรทัศน์จำนวน 30 เครื่อง ดังตารางที่ 3.1

รูปแบบที่ 2 เก็บตัวอย่างอนุภาคทั้ง 2 ขนาดแบบแยกขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรทัศน์จากขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน และขั้นตอนการทុบจ่อแล้วเก็บตัวอย่างต่อไปจนมีเวลาในการเก็บตัวอย่างแต่ละขั้นตอนครบ 60 นาที ภายใน Chamber ขนาด 0.6 ลูกบาศก์เมตร เพื่อวิเคราะห์การปลดปล่อยโลหะหนักในแต่ละขั้นตอน โดย 1 ตัวอย่างมีการรื้อแยกโทรทัศน์รวมกันจำนวน 3 เครื่อง ทำการเก็บตัวอย่างโดยใช้โทรทัศน์จำนวน 30 เครื่อง ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่าง PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่ทำการศึกษา

ตัวอย่างโทรทัศน์	การรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบตลอดกระบวนการ (ตัวอย่าง)		การรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบแยกขั้นตอน (ตัวอย่าง)			
			การแยกชิ้นส่วน		การทុบจ่อ	
	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
โทรทัศน์ขนาดเล็ก	15	15	5	5	5	5
โทรทัศน์ขนาดใหญ่	15	15	5	5	5	5
รวม	30	30	10	10	10	10



รูปที่ 3.2 การเก็บตัวอย่าง PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการรื้อแยกซากโทรศัพท์แท่นภายใน chamber

3.2. อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง

3.2.1. อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง PM_{2.5} และ PM_{10-2.5}

1) กระจดาษกรองชนิด Polytetrafluoroethylene (PTFE) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 37 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุนขนาด 2 ไมโครเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุนขนาด 2 ไมโครเมตร

2) อุปกรณ์คัดขนาดฝุ่นชนิด Personal Modular Impactors (PMI) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้มีค่า Cut-point อยู่ที่ 50%

3) เครื่องเก็บอากาศเฉพาะบุคคล (Leland Legacy Sample Pump) ยี่ห้อ SKC

4) ชุดปรับอัตราการไหลมาตรฐานโดย calibration adapter ต่อกับ Rotameter ยี่ห้อ TSI Model 4140F

3.2.2 การเตรียมกระจดาษกรอง

แช่กระจดาษกรองชนิด PTFE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 37 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ในสารละลาย Acetone ประมาณ 15 นาที แล้วนำมาทิ้งให้แห้งบนกระจกนาฬิกาประมาณ 5 นาที จากนั้นนำไปดูดความชื้นในตู้ดูดความชื้นอย่างน้อย 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำกระจดาษกรองทั้ง 2 ขนาด ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 7 ตำแหน่ง พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักก่อนการเก็บตัวอย่าง

3.2.3 การวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetric analysis)

ชั่งน้ำหนักกระจดาษกรองด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 7 ตำแหน่ง โดยก่อนและหลังการชั่งกระจดาษกรองควบคุมคุณภาพ (Quality control) โดยชั่งน้ำหนักของตุ้มน้ำหนัก 100 และ 200

มิลลิกรัม จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักกระดาษกรองแต่ละชนิด จำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักของกระดาษกรองทั้งก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 จดบันทึกรายละเอียดซากโทรทรรศน์ก่อนการรื้อแยก

จดบันทึกยี่ห้อ ขนาด และข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องของซากโทรทรรศน์แต่ละเครื่อง ก่อนการเก็บตัวอย่าง PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} เพื่อเป็นใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณการปลดปล่อยในลำดับถัดไป

3.3.2 วิธีการเก็บตัวอย่างอนุภาค PM_{2.5} และ PM_{10-2.5}

1) การรื้อแยกซากโทรทรรศน์แบบตลอดกระบวนการ

เก็บตัวอย่าง PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ด้วยการติดตั้งปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศเฉพาะบุคคลที่ได้ปรับอัตราการไหลของอากาศก่อนเก็บตัวอย่างไว้ที่ประมาณ 10 ลิตรต่อนาที เข้ากับอุปกรณ์คัดขนาดฝุ่นชนิด PMI ที่ได้บรรจุกระดาษกรองชนิด PTFE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 37 มิลลิเมตร และมีรูพรุนขนาด 2 ไมโครเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร และมีรูพรุนขนาด 2 ไมโครเมตรเรียบร้อยแล้ว จากนั้นติดตั้งชุดอุปกรณ์ภายใน Chamber ขนาด 0.6 ลูกบาศก์เมตร จากนั้นเก็บตัวอย่างตลอดการรื้อแยกซากโทรทรรศน์ 1 เครื่อง จำนวน 30 เครื่อง รวมทั้งสิ้น 60 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งหลังจากเก็บตัวอย่างเสร็จในแต่ละครั้ง จะต้องทำการวัดอัตราการไหลของอากาศจากปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศชนิดพกพาหลังเก็บตัวอย่าง เพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของอากาศในลำดับถัดไป

2) การรื้อแยกซากโทรทรรศน์แบบแยกขั้นตอน

เก็บตัวอย่าง PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ด้วยการติดตั้งปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศเฉพาะบุคคลที่ได้ปรับอัตราการไหลของอากาศก่อนเก็บตัวอย่างไว้ที่ประมาณ 10 ลิตรต่อนาที เข้ากับอุปกรณ์คัดขนาดฝุ่นชนิด PMI ที่ได้บรรจุกระดาษกรองชนิด PTFE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 37 มิลลิเมตร และมีรูพรุนขนาด 2 ไมโครเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร และมีรูพรุนขนาด 2 ไมโครเมตรเรียบร้อยแล้ว จากนั้นติดตั้งชุดอุปกรณ์ภายใน Chamber ขนาด 0.6 ลูกบาศก์เมตร จากการรื้อแยกซากโทรทรรศน์ในแต่ละขั้นตอน โดยการรื้อแยกซากโทรทรรศน์ 1 เครื่อง สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังตารางที่ 3.1 ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคขั้นตอนละ 20 ตัวอย่าง ซึ่งใน 1 ตัวอย่างมีการรื้อแยกโทรทรรศน์รวมกันจำนวน 3 เครื่อง จากโทรทรรศน์จำนวน 30 เครื่อง รวมทั้งสิ้น 40 ตัวอย่าง พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างอากาศภายนอก Chamber ด้วยวิธีเดียวกัน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานของอากาศในพื้นที่ ซึ่ง

หลังจากเก็บตัวอย่างเสร็จในแต่ละครั้ง จะต้องทำการวัดอัตราการไหลของอากาศจากปั๊มเก็บตัวอย่าง อากาศชนิดพกพาหลังเก็บตัวอย่าง เพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของอากาศในลำดับถัดไป

3.3.3 การเก็บรักษาตัวอย่าง

นำกระดาษกรองทั้ง 2 ขนาดที่ผ่านการเก็บตัวอย่างแล้วออกจากอุปกรณ์คัดขนาดฝุ่น ชนิด PMI เก็บลงในตลับเก็บกระดาษกรองที่ทำจากพลาสติกทึบแสงแล้วพันส่วนรอยต่อฝาปิดด้วย พาราฟิล์ม เพื่อนำตัวอย่างจากบริเวณที่เก็บตัวอย่างไปยังห้องปฏิบัติการ เมื่อถึงห้องปฏิบัติการนำ กระดาษกรองตัวอย่างใส่ในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักและบันทึก น้ำหนักของกระดาษกรองหลังเก็บตัวอย่าง แล้วเก็บกระดาษกรองในภาชนะที่มีฉนวนเพื่อรอการ วิเคราะห์ต่อไป

3.3.4 การสกัดและวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างฝุ่นบนกระดาษกรอง

สกัดโลหะหนักจากตัวอย่างกระดาษกรองทั้ง 2 ขนาด ที่ผ่านการเก็บตัวอย่างแล้ว ด้วย เครื่อง Microwave digester (CEM MARS-5) ใช้กรด HNO_3 40% ที่มีความบริสุทธิ์สูง ปริมาตร 10 มิลลิลิตรย่อยเป็นระยะเวลา 30 นาที (step I: 1,200 W ที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 17.5 นาที, step II: 1,200 W ที่อุณหภูมิ 185 °C เป็นเวลา 13 นาที) หลังจากย่อยตัวอย่างครบตามเวลาที่ กำหนดแล้ว ถ่ายสารละลายลงในบีกเกอร์ Teflon และนำไประเหยบน hot plate จนเหลือสารอยู่ใน บีกเกอร์ Teflon ประมาณ 0.1 มิลลิลิตร รอให้สารละลายเย็น จากนั้นเติม Ultrapure (Type I) water ประมาณ 2 – 3 มิลลิลิตร ก่อนที่จะกรองสารละลายผ่าน PTFE syringe filter ลงในขวดปรับ ปริมาตรขนาด 5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วย Ultrapure (Type I) water ซึ่งในการย่อยแต่ละ รอบต้องมีแปลงก็โดยทำวิธีการเช่นเดียวกันแต่ใส่กระดาษกรองที่ไม่ผ่านการเก็บตัวอย่าง และสกัดด้วย ขั้นตอนเดียวกัน จากนั้นเก็บสารละลายตัวอย่างในขวด Polyethylene และแช่ในตู้แช่เย็น (ช่องแช่ เย็นปกติ) เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

นำสารละลายตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7700x โดยวิเคราะห์โลหะหนัก 11 ชนิด ได้แก่ สารหนู เบริลเลียม แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และ สังกะสี

3.3.5 การควบคุมคุณภาพภายในห้องปฏิบัติการ

เพื่อให้แน่ใจได้ว่าข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนการสกัดด้วยเครื่อง Microwave digester และ วิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างอนุภาคบนกระดาษกรองด้วยเครื่อง ICP-MS ที่มีค่าความสามารถใน

การอ่าน (Readability) อยู่ที่ 0.1 ng/L มีความน่าเชื่อถือ จึงทำการควบคุมคุณภาพการภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะต้องวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ดังนี้

1) การวิเคราะห์ Reagent blank

การวิเคราะห์ Reagent blank ทำได้โดยการเตรียมสารละลายกรด HNO_3 40% ที่มีความบริสุทธิ์สูง ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่ใช้ในการสกัดตัวอย่าง ผ่านกระบวนการสกัดที่รอบคอบที่มีการสกัดตัวอย่าง และการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสารละลายตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นจากการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการสกัดตัวอย่าง และขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง

2) การวิเคราะห์ประสิทธิภาพวิธีการสกัดตัวอย่าง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพวิธีการสกัดตัวอย่างโดยใช้ตัวอย่างอ้างอิงที่ทราบความเข้มข้นของโลหะ (Standard Reference Materials, SRM) อย่างน้อย 7 ซ้ำ โดยนำตัวอย่างอ้างอิงมาเติมสารละลายกรด HNO_3 40% ที่มีความบริสุทธิ์สูง ปริมาตร 10 มิลลิลิตร มาผ่านกระบวนการสกัด และการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสารละลายตัวอย่างก่อนการสกัดตัวอย่างจริง เพื่อควบคุมประสิทธิภาพวิธีการสกัดตัวอย่าง โดยนำความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เฉลี่ย แล้วเปรียบเทียบกับความเข้มข้นโลหะหนักในตัวอย่างอ้างอิงที่ทราบ ซึ่งสามารถยอมรับประสิทธิภาพวิธีการสกัดตัวอย่างได้ เมื่อมีค่าความเข้มข้นโลหะหนักที่ได้จากการวิเคราะห์ในช่วง 80 – 120 % ของความเข้มข้นโลหะหนักในตัวอย่างอ้างอิงที่ทราบ

3) การหาปริมาณโลหะหนักโดยการสร้าง Calibration curve

การสร้าง Calibration curves ของโลหะหนักโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักผสม 11 ชนิด ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 15 ความเข้มข้น โดยเลือกช่วงความเข้มข้นที่ 5-1,000 $\mu\text{g/L}$ พิจารณาปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่ครอบคลุมโลหะหนักแต่ละชนิด จากนั้นวิเคราะห์ด้วย เครื่อง ICP-MS โดยระหว่างการวิเคราะห์ตัวอย่างนั้นจะมีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทุกๆ 10 ตัวอย่าง เพื่อทวนสอบความถูกต้องของความเข้มข้นที่วัดได้ ซึ่งค่าที่อ่านได้ควรมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) $\pm 10 \%$

4) Limits of detection (LOD) และ Limit of quantification (LOQ)

LOD และ LOQ สามารถหาได้จากการวัดสัญญาณของสารละลายแบล็ก จำนวน 10 ซ้ำ จากเครื่อง ICP-MS แล้วทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า LOD ค่า LOQ ได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\text{LOD} = 3 \times \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน} \quad (3.1)$$

$$\text{LOQ} = 10 \times \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน} \quad (3.2)$$

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

จากขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง ทำให้ได้ข้อมูลน้ำหนักอนุภาค $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ รวมถึงข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักมาแล้วนั้น จะต้องทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ดังนี้

3.4.1 การคำนวณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$

การคำนวณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกาะติดบนกระดาษกรองหลังการเก็บตัวอย่าง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3 – 3.6

$$\text{น้ำหนักก่อนหรือหลังเก็บตัวอย่าง (mg)} = (\text{น้ำหนักจากการชั่งทั้ง 3 ครั้ง}) / 3 \quad (3.3)$$

$$\text{น้ำหนักอนุภาคที่เก็บได้ (\mu g)} = (\text{น้ำหนักหลังเก็บตัวอย่าง} - \text{น้ำหนักก่อนเก็บตัวอย่าง}) \times 10^3 \quad (3.4)$$

$$\text{ปริมาตรอากาศ (m}^3\text{)} = \text{อัตราการไหลของอากาศ (m}^3\text{/min)} \times \text{เวลาที่ใช้เก็บตัวอย่าง (min)} \quad (3.5)$$

$$\text{ปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้น (\mu g / m}^3\text{)} = \text{น้ำหนักอนุภาคที่เก็บได้ (\mu g)} / \text{ปริมาตรอากาศ (m}^3\text{)} \quad (3.6)$$

3.4.2 การคำนวณน้ำหนักของโลหะหนักในสารละลาย

การคำนวณน้ำหนักโลหะหนักในสารละลายตัวอย่างหลังจากการสกัดตัวอย่างแล้ว สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.7 – 3.8

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของโลหะหนัก (\mu g / L)} &= \text{ความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่าง (\mu g / L)} \\ &\quad - \text{ความเข้มข้นของโลหะหนักของแบล็ก (\mu g / L)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\text{น้ำหนักโลหะหนัก (\mu g)} = \text{ความเข้มข้นของโลหะหนัก (\mu g / L)} \times \text{ปริมาตรสารละลายตัวอย่าง (L)} \quad (3.8)$$

3.4.3 การคำนวณปริมาณการรับสัมผัสโลหะหนักในอากาศ และความเข้มข้นของโลหะหนักที่ปลดปล่อยในแต่ละขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรศัพท์

การคำนวณปริมาณการรับสัมผัสโลหะหนักในอากาศ และการคำนวณความเข้มข้นของโลหะหนักที่ปลดปล่อยในแต่ละขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรศัพท์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.9

$$\text{ความเข้มข้นของโลหะหนักในอากาศ (\mu g / m}^3\text{)} = \text{น้ำหนักโลหะหนัก (\mu g)} / \text{ปริมาตรอากาศ (m}^3\text{)} \quad (3.9)$$

3.4.4 การคำนวณปริมาณโลหะหนักต่อน้ำหนัก $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$

การคำนวณปริมาณโลหะหนักต่อน้ำหนัก $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3.10

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณโลหะหนักต่อน้ำหนักอนุภาค (\mu g / mg)} &= \text{น้ำหนักโลหะหนัก (\mu g)} / \\ &\quad \text{น้ำหนักอนุภาคที่เก็บได้ (mg)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

3.4.5 การคำนวณอัตราการปลดปล่อยโลหะหนัก (Emission rate)

การคำนวณอัตราการปลดปล่อยโลหะหนักจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์สามารถคำนวณได้จากค่าตัวคูณการปลดปล่อย และอัตราของกิจกรรมที่ได้จากการสอบถาม ซึ่งพบว่าในหนึ่งสัปดาห์คนงานจะทำการรื้อแยกซากโทรศัพท์ 30 เครื่อง/วัน จึงนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณดังสมการที่ 3.11 – 3.12 และค่าที่เกี่ยวข้องในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.2

$$\text{ตัวคูณการปลดปล่อย}(\mu\text{g}/\text{machine}) = \frac{\text{ความเข้มข้นของโลหะหนัก} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{L}}\right) \times \text{ปริมาตรสารละลายตัวอย่าง (L)}}{\text{ซากโทรศัพท์ (machine)}} \quad (3.11)$$

$$\text{อัตราการปลดปล่อย} = \text{อัตราของการรื้อแยกซากโทรศัพท์} \times \text{ตัวคูณการปลดปล่อย}(\mu\text{g}/\text{machine}) \quad (3.12)$$

ตารางที่ 3.2 ค่าที่เกี่ยวข้องในการคำนวณอัตราการปลดปล่อยโลหะหนักจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์

หน่วยของ อัตราการปลดปล่อย	อัตราของการรื้อแยกซาก โทรศัพท์	จำนวนคร้วเรือน (คร้วเรือน)	ระยะเวลา
$\mu\text{g} / \text{day}$	30 machine/day	1	1 วัน
$\mu\text{g} / \text{year}$	1,560 machine/year	1	1 ปี
$\mu\text{g} / \text{year}$	163,800 machine/year	105	

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS statistics ดังต่อไปนี้

3.5.1 วิเคราะห์ความแตกต่างความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดระหว่างบนอนุภาค $\text{PM}_{2.5}$ กับ $\text{PM}_{10-2.5}$ จากตัวอย่างในแต่ละชั้นตอน ด้วยค่าสถิติ T-test

3.5.2 วิเคราะห์หาช่วงของค่าความเสี่ยงสำหรับสารก่อมะเร็งและสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง ด้วยค่า 95% Confidence level

3.6 การประเมินความเสี่ยง (Health Risk Assessment)

การประเมินโอกาสที่จะเกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคนงานที่รื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์จากการได้รับสัมผัสโลหะหนักผ่านการหายใจ สามารถประเมินได้ตามวิธีของ U.S. EPA ซึ่งการประเมินความเสี่ยงประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

3.6.1 การระบุความเป็นอันตรายของสาร (Hazard Identification)

การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อระบุชนิดของสารเคมีที่เกิดขึ้นจากการทำกิจกรรม และผลกระทบต่อสุขภาพเมื่อได้รับสัมผัสสารเคมีจากช่องทางต่างๆ ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึง เพียงการรับสัมผัสทางการหายใจ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การระบุค่าความเป็นอันตรายจากโลหะหนักในขยะอิเล็กทรอนิกส์

โลหะหนัก	ประเภทการก่อเกิดมะเร็ง	Reference
As	Classification A; human carcinogen	RAIS, 1992
Ba	Classification D; Not classifiable as to human carcinogenicity	IRIS, 1998
Be	Classification B1; Probable human carcinogen	IRIS, 1998
Cd	Classification B1; Probable human carcinogen	OEHHA, 2008
Cr	Classification A; Human carcinogen	IRIS, 1998
Cu	Classification D; Not classifiable as to human carcinogenicity	RAIS, 1992
Mn	Classification D; Not classifiable as to human carcinogenicity	RAIS, 1992
Ni	Classification A; human carcinogen	IRIS, 1995
Pb	Classification B2; probable human carcinogen	RAIS, 1994
Sb	Classification D; Not classifiable as to human carcinogenicity	IRIS, 1999
Zn	Classification D; Not classifiable as to human carcinogenicity	IRIS, 2005

3.6.2 การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณที่ได้รับ (Dose-response Assessment)

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารมลพิษที่ได้รับสัมผัสและผลกระทบต่อที่เกิดขึ้น ในการประเมินค่าความเสี่ยงของโลหะหนักผ่านการสัมผัสผ่านการหายใจ ค่าที่แสดงถึงระดับความปลอดภัยจะแสดงเป็นค่า Inhalation reference concentration สำหรับสารที่ไม่ก่อมะเร็ง และค่า Cancer slope factor พร้อมทั้งค่าInhalation unit risk สำหรับสารก่อมะเร็ง จากฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องสามารถแสดงค่าต่างๆ ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณความเสี่ยงต่อไป ดังตารางที่ 3.4

3.6.3 การประเมินการรับสัมผัส (Exposure Assessment)

การประเมินการรับสัมผัสปริมาณโลหะหนักที่คนงานได้รับทางการหายใจ ใช้ข้อมูลบางส่วนอ้างอิงจาก U.S. EPA 2001, U.S. EPA 2011 และข้อมูลบางส่วนได้จากการสอบถาม ซึ่งพบว่าในหนึ่งสัปดาห์คนงานจะทำการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 วัน (EF = 52 วัน/ปี) ในแต่ละวันใช้เวลา

ทำงาน 8 ชั่วโมง (ET = 8) สามารถรื้อแยกซากโทรทัศน์ได้ 30 เครื่อง (N = 30 เครื่อง) จึงนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณปริมาณการรับสัมผัสโดยสามารถแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 3.4 Inhalation reference concentration, Cancer slope factor และ Inhalation unit risk ของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิด

โลหะหนัก	RfC inhalation (mg/m ³)	Reference	Cancer slope factor (mg/kg.day) ⁻¹	Reference	Inhalation unit risk (µg/m ³) ⁻¹	Reference
As	1.50 × 10 ⁻⁴	CALEPA	-	-	4.30 × 10 ⁻³	IRIS, 1995
Ba	1.40 × 10 ⁻⁴	IRIS, 2006	-	-	-	-
Be	2.00 × 10 ⁻⁵	EPA, 1994	-	-	2.4 × 10 ⁻³	EPA, 1997
Cd	2.00 × 10 ⁻²	EPA, 2001a	1.50 × 10 ⁻¹	OEHHA, 2009	1.80 × 10 ⁻³	EPA, 1987
Cr	1.00 × 10 ⁻⁴	IRIS, 1998	4.10 × 10 ⁻¹	EPA, 1991	1.20 × 10 ⁻²	EPA, 1987
Cu	2.00 × 10 ⁻³	EPA, 2001a	-	-	-	-
Mn	5.00 × 10 ⁻⁵	EPA, 1986	-	-	-	-
Ni	1.50 × 10 ⁻⁴	EPA, 2001a	9.10 × 10 ⁻¹	OEHHA, 2009	2.40 × 10 ⁻⁴	EPA, 1987
Pb	1.50 × 10 ⁻²	EPA, 2001a	4.20 × 10 ⁻²	OEHHA, 2009	1.20 × 10 ⁻⁵	EPA, 1987
Sb	2.00 × 10 ⁻⁴	IRIS, 1999	-	-	-	-
Zn	3.00 × 10 ⁻¹	EPA, 2005	-	-	-	-

1) โลหะหนักที่ไม่ก่อมะเร็ง (Non – carcinogenic metals) สามารถคำนวณปริมาณโลหะหนักที่คนงานได้รับทางการหายใจได้จากค่า EC (Exposure concentration) ดังสมการที่ (3.13)

$$EC = C \times N \times CF \times ET \times EF \times ED / AT \quad (3.13)$$

2) โลหะหนักที่ก่อมะเร็ง (Carcinogenic metals) สามารถคำนวณปริมาณโลหะหนักที่คนงานได้รับทางการหายใจได้จากค่า CDI (Chronic daily intake) ดังสมการที่ 3.14

$$CDI = (C \times N \times CF \times IR \times ET \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (3.14)$$

ตารางที่ 3.5 ความหมายของตัวแปรที่ใช้แทนค่าในสมการการรับสัมผัสทางการหายใจ

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย	ค่าคงที่	แหล่งอ้างอิง
C	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่บุคคลรับสัมผัสจากโทรทัศน์ 1 เครื่อง	$\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{machine}$	-	-
N	จำนวนโทรทัศน์ที่รื้อแยกได้ใน 1 วัน	machine	30	การสอบถาม
CF	Conversion factor	$\text{mg}/\mu\text{g}$	0.001	-
IR	อัตราการหายใจ	m^3/hrs	2.1	EPA, 2011
ET	เวลาในการรับสัมผัส	hrs/day	8	การสอบถาม
EF	ความถี่ของการรับสัมผัส	day/years	52	EPA, 2001
ED	ระยะเวลาที่ได้รับสัมผัส	years	30	EPA, 2001
BW	น้ำหนักตัว	kg	68	การสอบถาม
AT	ระยะเวลาเฉลี่ยที่ได้รับสัมผัสสาร	Cancer = $70 \times 365 \text{ days}$ Non-cancer = $\text{ED} \times 365 \times 24 \text{ hrs}$		EPA, 2001

3.6.4 การระบุค่าความเสี่ยง (Risk Characterization)

การรวบรวมเอาข้อมูลและผลการวิเคราะห์ของสามขั้นตอนข้างต้นมาใช้คำนวณความเสี่ยงหรือโอกาสที่จะเกิดผลเสียต่อบุคคลที่รื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์

1) โลหะหนักที่ไม่ก่อมะเร็ง (Non – carcinogenic metals) การวิเคราะห์ค่าความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Hazard Quotient หรือ HQ) คำนวณได้จากสมการที่ 3.15

$$\text{HQ} = \text{EC} / \text{RfC Inhalation} \quad (3.15)$$

ถ้า HQ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 แสดงว่า ความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับโลหะหนักยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากนั้นคำนวณค่า Hazard Index (HI) โดยรวมจากค่า HQ เพื่อแสดงค่าความเสี่ยงโดยรวมที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่ออวัยวะเป้าหมายเดียวกัน ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.16

$$\text{HI} = \sum \text{HQ} \quad (3.16)$$

ถ้า HI ของคนงานแต่ละคนมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 คาดว่าจะไม่เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสโลหะหนักที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง

2) โลหะหนักที่ก่อมะเร็ง (Carcinogenic metals) การวิเคราะห์ค่าความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Lifetime cancer risk) คำนวณได้จากสมการที่ 3.17 – 3.18

$$\text{Cancer slope factor (CSF)} = \text{Unit risk (ug/m}^3\text{)}^{-1} \times 70 \text{ kg} \times (20 \text{ m}^3\text{/day)}^{-1} \times 1000 \text{ ug/mg} \quad (3.17)$$

$$\text{Lifetime cancer risk} = \text{CDI} \times \text{CSF} \quad (3.18)$$

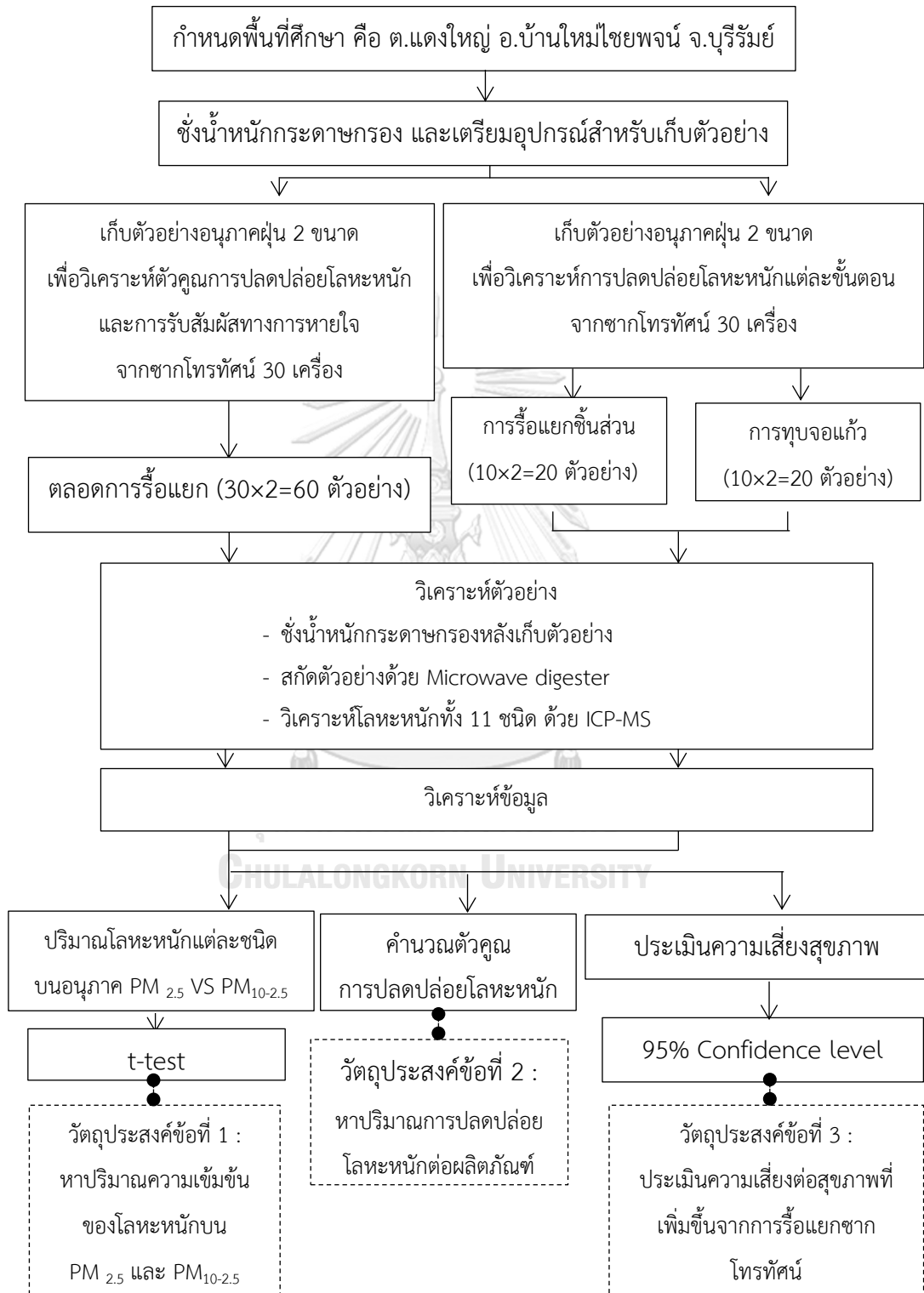
ในกรณีที่ค่า Lifetime cancer risk มีค่าระหว่าง 1×10^{-6} - 1×10^{-4} ถือว่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสสารนั้นๆ ยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ (U.S. EPA, 1991) จากนั้นคำนวณค่าผลรวมของความเสี่ยงที่คนงานได้รับสัมผัสสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งคำนวณได้จากสมการที่ 3.19

$$\text{Total lifetime cancer risk} = \sum \text{Lifetime cancer risk}_i \quad (3.19)$$

ในกรณีที่ค่า Total lifetime cancer risk มีค่าระหว่าง 1×10^{-6} - 1×10^{-4} แสดงถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

3.7 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยฉบับนี้ มีรายละเอียดและลำดับการดำเนินการดังรูปที่ 3.2



บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น

4.1.1 ประสิทธิภาพการสกัดตัวอย่าง

วิเคราะห์ประสิทธิภาพวิธีการสกัดตัวอย่าง โดยสกัดตัวอย่างอ้างอิงที่ทราบความเข้มข้นของโลหะ (Standard Reference Materials, SRM) คือ NIST 1648a Urban Particulate Matter จำนวน 12 ตัวอย่าง ด้วยวิธีการสกัด และการวิเคราะห์เช่นเดียวกับกระดาดกรองตัวอย่าง พบค่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (%recovery) เฉลี่ยของสารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าระหว่าง 79.8 – 117.5, 80.5 – 119.6, 20.5 – 70.4, 79.5 – 107.9, 85.7 – 113.1, 90.2 – 114.7, 81.0 – 118.2, 44.7 – 120.9 และ 83.8 – 115.4 % ของความเข้มข้นโลหะหนักในตัวอย่างอ้างอิงที่ทราบ ตามลำดับ

เนื่องจากผลการวิเคราะห์ค่า % recovery ของโครเมียม มีค่าเพียง 20.5 – 70.4 % ซึ่งไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในช่วง 80 – 120 % จึงได้มีการคำนวณกลับเพื่อให้เป็น 100 % ด้วยการคูณค่า Recovery factor (R) โดยค่า R คำนวณจาก 100% หารด้วย %recovery ของ SRM ที่ได้จากการสกัดในตัวอย่างในแต่ละรอบ ซึ่งผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของโครเมียมในข้อ 4.3, 4.4 และ 4.5 ได้มีการคูณกลับด้วยค่า R แล้ว โดยกำหนดสัญลักษณ์เป็น “ *Cr ”

4.1.2 กราฟมาตรฐาน (Calibration curves)

ทำการสร้าง Calibration curves ของโลหะหนักทุกชนิดในช่วงความเข้มข้นที่ 5 - 1,000 $\mu\text{g/L}$ ทูกรอบที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) ซึ่งการวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 รอบตามรูปแบบการเก็บตัวอย่าง ยกเว้นพลวงที่ทำการวิเคราะห์ด้วย ICP-MS เพียงรอบเดียว เนื่องจากใช้สารละลายมาตรฐานโลหะหนักผสมต่างจากโลหะหนักอื่นๆ โดยแสดงกราฟมาตรฐานในภาคผนวก ก พบว่าผลการวิเคราะห์ค่า R^2 ของกราฟมาตรฐานของสารหนู เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี มีค่าระหว่าง 0.9985 – 0.999 ดังตารางที่ 4.1

4.1.3 การทวนสอบความถูกต้องของค่าที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโลหะหนักความเข้มข้น 100 $\mu\text{g/L}$ ทุกๆ 10 ตัวอย่างระหว่างการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อทวนสอบความถูกต้องของความเข้มข้นที่วัดได้จาก

เครื่อง ICP-MS จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโลหะหนักที่อ่านค่าได้มาคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ซึ่ง %RSD เฉลี่ยของสารหนู เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี มีค่า 1.827, 1.337, 3.197, 1.218, 0.872, 1.757, 0.914, 2.817, 3.544, 2.194 ตามลำดับ

4.1.4 ค่า Limit of detection (LOD) และ Limit of quantization (LOQ)

Limit of detection (LOD) บ่งบอกถึงค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างที่สามารถตรวจวัดได้ และ Limit of quantization (LOQ) บ่งบอกถึงค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ในตัวอย่างที่สามารถหาปริมาณ ซึ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือในการรายงานผลของข้อมูลเพื่อยืนยันความถูกต้องเหมาะสมของวิธีการวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งสามารถหาได้จากการวัดสัญญาณของ Ultrapure (Type I) water จำนวน 10 ซ้ำ ด้วยเครื่อง ICP-MS แล้วทำการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เพื่อคำนวณค่า LOD และ LOQ ในลำดับถัดไป แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการประกันคุณภาพในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

โลหะ หนัก	R ² ของกราฟมาตรฐาน		LOD (µg/L)		LOQ (µg/L)	
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 1	รอบที่ 2
As	0.9999	0.9996	0.038	0.135	0.103	0.449
Ba	0.9996	0.9993	4.510	7.443	15.031	24.809
Be	0.9993	0.9995	0.159	0.232	0.531	0.772
Cd	0.9998	0.9997	0.132	0.260	0.441	0.866
Cr	0.9999	0.9996	0.094	0.230	0.314	0.766
Cu	0.9998	0.9986	2.351	11.494	7.837	38.312
Mn	0.9990	0.9988	2.143	1.005	7.143	3.349
Ni	0.9998	0.9996	1.280	0.827	4.267	2.756
Pb	0.9996	0.9997	0.042	0.097	0.140	0.324
Zn	0.9993	0.9992	0.932	10.003	3.107	33.343
Sb	0.9985		0.095		0.316	

4.2 ปริมาณอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM_{2.5}) และระหว่าง 2.5 – 10 ไมโครเมตร (PM_{10-2.5})

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากกิจกรรมการรื้อแยกซากโทรศัพท์ศึนภายใน Chamber ที่เก็บด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศเฉพาะบุคคล (Leland Legacy Sample Pump) ต่อ

กับหัวข้อขนาดฝุ่น PMI แยกเป็น 2 ส่วน คือ ปริมาณอนุภาคที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ และที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบแยกชิ้นตอน

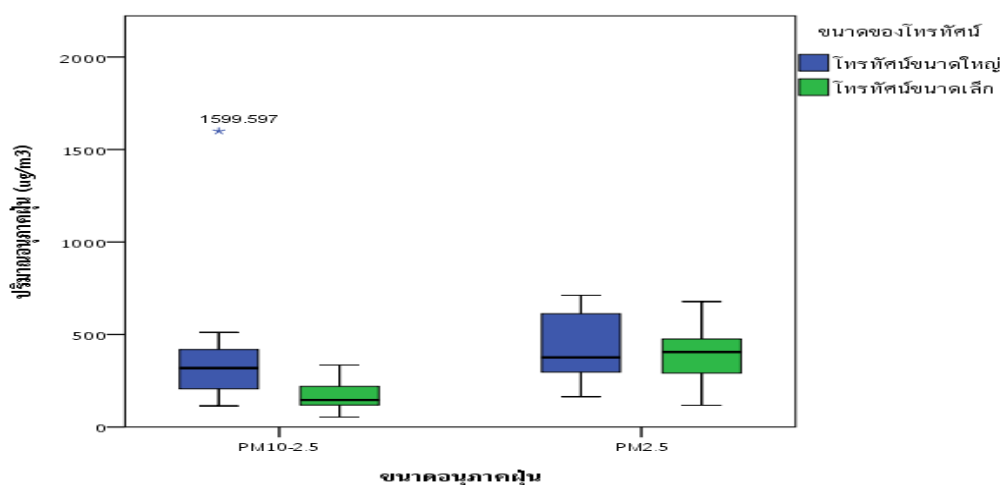
4.2.1 ปริมาณ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากกิจกรรมการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ (21 นิ้ว) ประกอบด้วย ยี่ห้อ SAMSUNG 3 เครื่อง PANASONIC, FAMILLY, SANYO และ JVC ยี่ห้อละ 2 เครื่อง PHILIP, TOSHIBA และ ONTDA ยี่ห้อละ 1 เครื่อง รวมทั้งสิ้น 14 เครื่อง และโทรทัศน์ขนาดเล็ก (14 นิ้ว) ประกอบด้วย ยี่ห้อ NATIONAL 3 เครื่อง SHARP และ SAMSUNG ยี่ห้อละ 2 เครื่อง ยี่ห้อ DISTAR, MITSUI, ALPHA, SONNY, SANYO, THOMSON, HITACHI และ LG ยี่ห้อละ 1 เครื่อง รวมทั้งสิ้น 15 เครื่อง โดยแสดงปริมาณ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ในภาคผนวก ข พบว่า ปริมาณ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากกิจกรรมการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 163.6 - 711.8 และ 114.2 - 1,599.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.2) เมื่อนำมาทดสอบสถิติ T-test พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอนุภาคทั้งสองขนาดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังรูปที่ 4.1) สำหรับปริมาณอนุภาคทั้งสองขนาดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดเล็กอยู่ในช่วง 117.2 - 678.2 และ 53.5 - 335.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.2) เมื่อนำมาทดสอบสถิติ T-test พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอนุภาคทั้งสองขนาดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก มีความแตกต่างทางสถิติ ($p = 0.05$) (ดังรูปที่ 4.1)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ

ขนาดโทรทัศน์	ขนาดอนุภาค	Min – Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mean \pm SD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
ขนาดใหญ่	PM _{2.5}	163.6 - 711.8	420.0 \pm 168.9 ^a _A
	PM _{10-2.5}	114.2 - 1,599.6	397.6 \pm 363.7 ^a _A
	PM ₁₀ (PM _{10-2.5} + PM _{2.5})	444.3 - 2,014.8	817.5 \pm 415.4
	สัดส่วนระหว่าง PM _{2.5} / PM ₁₀	0.2 - 0.8	0.6 \pm 0.2
ขนาดเล็ก	PM _{2.5}	117.2 - 678.2	399.8 \pm 158.6 ^a _A
	PM _{10-2.5}	53.5 - 335.0	175.8 \pm 85.5 ^b _A
	PM ₁₀ (PM _{10-2.5} + PM _{2.5})	170.8 - 987.8	575.6 \pm 238.1
	สัดส่วนระหว่าง PM _{2.5} / PM ₁₀	0.6 - 0.8	0.7 \pm 0.1

หมายเหตุ : a, b อักษรมุมขวาบนที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างขนาดฝุ่นที่ต่างกันจากกลุ่มทีวีที่ขนาดเท่ากัน A, B อักษรมุมขวาล่างที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างฝุ่นขนาดเดียวกันที่เกิดจากทีวีที่มีขนาดต่างกัน



รูปที่ 4.1 ปริมาณ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการรื้อแยกซากไม้ขนาดใหญ่และขนาดเล็ก

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 เมื่อนำค่าเฉลี่ยปริมาณ $PM_{2.5}$ จากการรื้อแยกซากไม้ขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก ที่มีค่า 420.0 ± 168.9 และ $399.8 \pm 158.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ มาทดสอบสถิติ T-test พบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ และปริมาณ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากไม้ขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก ซึ่งมีค่า 397.6 ± 363.7 และ $175.8 \pm 85.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเช่นกัน

จากการสังเกตพบว่าปริมาณ $PM_{10-2.5}$ จากตัวอย่างซากไม้ขนาดใหญ่มีหนึ่งตัวอย่างที่มีค่าสูงแตกต่างจากกลุ่มตัวอย่างอื่นค่อนข้างมาก อาจจะเป็นผลจากสภาพซากไม้ที่เครื่องนี้มีปริมาณฝุ่นที่เกาะอยู่ภายนอกซากไม้ที่สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน รวมถึงค่าต่ำสุดและสูงสุดของข้อมูลแต่ละชุดมีความแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถกำหนดยี่ห้อของซากไม้ตัวอย่างได้ ทำให้ตัวอย่างไม้ที่เก็บตัวอย่างนั้นมียี่ห้อที่แตกต่างกัน รวมถึงไม่ได้มีการทำความสะอาดซากไม้ก่อนทำการรื้อแยกภายในตู้ปิด เพื่อให้กระบวนการรื้อแยกนั้นเหมือนกับที่คนงานรื้อแยกทำในสภาพปกติ

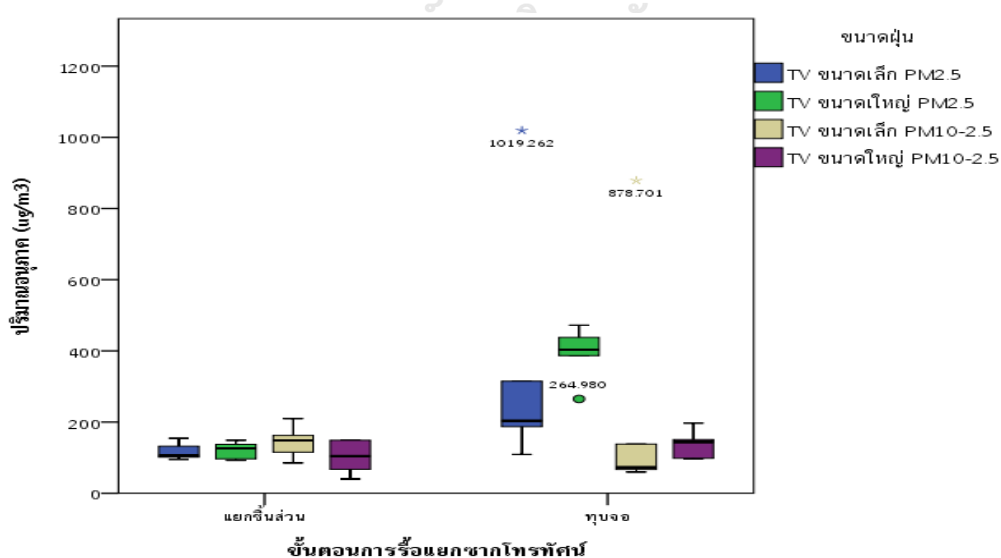
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคที่ต่างกัน พบว่าการรื้อแยกซากไม้ขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีค่าเฉลี่ยปริมาณระหว่าง $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนระหว่าง $PM_{2.5}/PM_{10}$ พบว่าค่าสัดส่วนเฉลี่ยของซากไม้ขนาดเล็กมีค่า 0.70 ซึ่งมากกว่าขนาดใหญ่ที่มีค่า 0.55 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการรื้อแยกซากไม้ทั้ง 2 ขนาดตลอดกระบวนการพบปริมาณ $PM_{2.5}$ มากกว่า $PM_{10-2.5}$ โดยเฉพาะจากการรื้อแยกซากไม้ขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Fang, Yang, and Xu (2013) ที่วิเคราะห์ปริมาณ $PM_{2.5}$ และ PM_{10} บริเวณที่มีกระบวนการรื้อแยกซากไม้ด้วยเครื่องจักรและรื้อแยกด้วยมือที่โรงงานรีไซเคิลแผ่นวงจรพิมพ์ และหลอดภาพรังสีคาโทดในประเทศจีน ที่พบค่าเฉลี่ยของสัดส่วนระหว่าง $PM_{2.5}/PM_{10}$

มีค่า 0.75 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาคั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าการรื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะโทรทัศน์และชิ้นส่วนที่เป็นองค์ประกอบภายในโทรทัศน์เป็นแหล่งกำเนิดของ $PM_{2.5}$

4.2.2 ปริมาณ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบแยกชิ้นตอน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ เฉลี่ยต่อ 1 เครื่องจากขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน และหุบจอซากโทรทัศน์ ชิ้นตอนละ 10 ตัวอย่าง โดยในแต่ละตัวอย่างรื้อแยกซากโทรทัศน์จำนวน 3 เครื่องที่มียี่ห้อต่างกัน เมื่อนำผลการศึกษามาเฉลี่ยเป็นรายเครื่อง โดยแสดงปริมาณ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ในภาคผนวก ค พบว่าปริมาณ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ในขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมีค่าระหว่าง 95.1 – 154.5 และ 85.3 – 209.8 $\mu g/m^3$ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.3) เมื่อนำมาทดสอบสถิติ T-test พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอนุภาคทั้งสองขนาดจากการแยกชิ้นส่วนโทรทัศน์ขนาดเล็ก ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังรูปที่ 4.2) ส่วนปริมาณ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ในขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ค่าระหว่าง 92.3 – 148.8 และ 40.3 – 150.0 $\mu g/m^3$ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.3) เมื่อนำมาทดสอบสถิติ T-test พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอนุภาคทั้งสองขนาดจากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังรูปที่ 4.2)

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 นำค่าเฉลี่ยปริมาณ $PM_{2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ซึ่งมีค่า 177.8 ± 24.9 และ 120.3 ± 24.9 $\mu g/m^3$ ตามลำดับ มาทดสอบสถิติ T-test พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ และนำค่าเฉลี่ยปริมาณ $PM_{10-2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ทั้งสองขนาด ซึ่งมีค่า 144.3 ± 47.3 และ 102.1 ± 48.7 $\mu g/m^3$ ตามลำดับ มาทดสอบสถิติ T-test พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ



รูปที่ 4.2 ปริมาณ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 เครื่อง

ตารางที่ 4.3 ปริมาณ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 เครื่องแบบแยกชั้นตอน

ชั้นตอน	ขนาดโทรทัศน์	ขนาดอนุภาค	Min – Max (µg/m ³)	Mean ± SD (µg/m ³)
แยกชิ้นส่วน	ขนาดเล็ก	PM _{2.5}	95.1 – 154.5	117.8 ± 24.9 ^{a 1}
		PM _{10-2.5}	85.3 – 209.8	144.3 ± 47.3 ^{a 1}
		PM ₁₀ (PM _{10-2.5} + PM _{2.5})	186.8 – 364.4	262.1 ± 67.3
		สัดส่วนระหว่าง PM _{2.5} / PM ₁₀	0.4 – 0.5	0.5 ± 0.1
		สัดส่วนระหว่าง PM _{10-2.5} / PM ₁₀	0.5 – 0.6	0.5 ± 0.1
	ขนาดใหญ่	PM _{2.5}	92.3 – 148.8	120.3 ± 24.9 ^{a 1}
		PM _{10-2.5}	40.3 – 150.0	102.1 ± 48.7 ^{a 1}
		PM ₁₀ (PM _{10-2.5} + PM _{2.5})	137.2 – 297.6	222.4 ± 70.9
		สัดส่วนระหว่าง PM _{2.5} / PM ₁₀	0.5 – 0.7	0.6 ± 0.1
		สัดส่วนระหว่าง PM _{10-2.5} / PM ₁₀	0.3 – 0.5	0.4 ± 0.1
ทุบจอ	ขนาดเล็ก	PM _{2.5}	109.1 – 1,019.3	366.7 ± 372.1 ^{a 1}
		PM _{10-2.5}	59.8 – 878.7	243.2 ± 356.6 ^{a 1}
		PM ₁₀ (PM _{10-2.5} + PM _{2.5})	181.8 – 1,898.0	610.0 ± 727.0
		สัดส่วนระหว่าง PM _{2.5} / PM ₁₀	0.5 – 0.8	0.7 ± 0.1
		สัดส่วนระหว่าง PM _{10-2.5} / PM ₁₀	0.2 – 0.5	0.3 ± 0.1
	ขนาดใหญ่	PM _{2.5}	265.0 – 472.1	393.0 ± 78.8 ^{a 2}
		PM _{10-2.5}	59.8 – 197.0	137.5 ± 41.6 ^{b 1}
		PM ₁₀ (PM _{10-2.5} + PM _{2.5})	409.0 – 669.0	530.4 ± 100.4
		สัดส่วนระหว่าง PM _{2.5} / PM ₁₀	0.7 – 0.8	0.7 ± 0.1
		สัดส่วนระหว่าง PM _{10-2.5} / PM ₁₀	0.2 – 0.4	0.3 ± 0.1

หมายเหตุ : a, b อักษรมุมขวามือที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างขนาดฝุ่นที่ต่างกันจากกลุ่มทีวีที่ขนาดเท่ากัน

A, B อักษรมุมขวาล่างที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างขนาดทีวีที่ต่างกันจากฝุ่นขนาดเท่ากัน

1, 2 อักษรมุมขวามือที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชั้นตอนที่ต่างกันจากฝุ่นและทีวีขนาดเท่ากัน

สำหรับขั้นตอนการทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดเล็พบปริมาณ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ แสดงปริมาณในภาคผนวก ค มีค่าระหว่าง 109.1 – 1,019.3 และ 59.8 – 878.7 $\mu g/m^3$ ตามลำดับ เมื่อนำมาทดสอบสถิติ T-test พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอนุภาคทั้งสองขนาดจากการทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดเล็ก ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังรูปที่ 4.2) ในขณะที่ปริมาณ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดใหญ่มีค่าระหว่าง 265.0 – 472.1 และ 59.9 – 196.9 $\mu g/m^3$ ตามลำดับ เมื่อนำมาทดสอบสถิติ T-test พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอนุภาคทั้งสองขนาดจากการทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดใหญ่ มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p = 0.05$) (ดังรูปที่ 4.2)

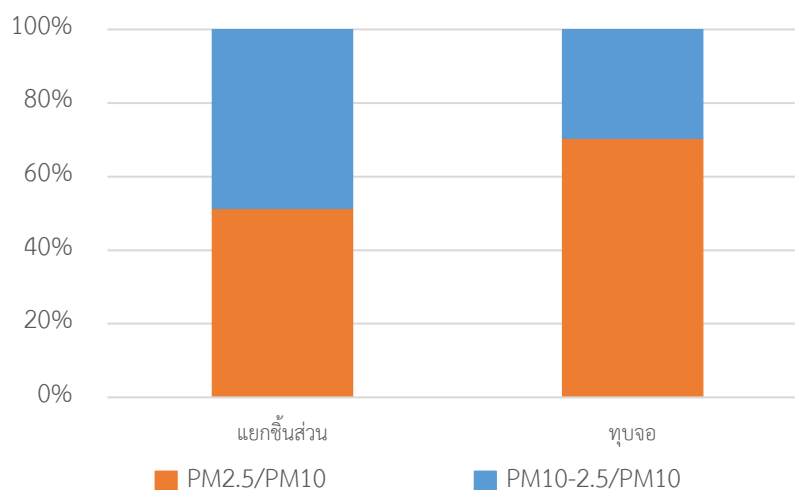
เมื่อนำค่าเฉลี่ยปริมาณ $PM_{2.5}$ จากการทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งมีค่า 366.7 ± 372.1 และ 393.0 ± 78.8 $\mu g/m^3$ ตามลำดับ มาทดสอบสถิติ T-test พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังรูปที่ 4.2) และนำค่าเฉลี่ยปริมาณ $PM_{10-2.5}$ จากการทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งมีค่า 243.2 ± 356.6 และ 137.5 ± 41.6 $\mu g/m^3$ ตามลำดับ มาทดสอบสถิติ T-test พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังรูปที่ 4.2) จึงสรุปได้ว่าขนาดของไอโรทซ์ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความแตกต่างของปริมาณอนุภาคทั้ง $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน และการทบทวนอย่างมีนัยสำคัญ

เพื่อเปรียบเทียบปริมาณอนุภาคที่ปลดปล่อยจากแต่ละขั้นตอนการรื้อแยกอากาศไอโรทซ์ จึงได้นำค่าเฉลี่ยปริมาณ $PM_{2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนและทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดเล็ก และค่าเฉลี่ยปริมาณ $PM_{10-2.5}$ จากทั้งสองขั้นตอนมาทดสอบสถิติ T-test พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอนุภาคทั้ง 2 ขนาดระหว่างขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนและการทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดเล็ก ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังรูปที่ 4.2)

จากนั้นทดสอบสถิติ T-test จากค่าเฉลี่ยปริมาณ $PM_{2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนและทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดใหญ่ พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p = 0.05$) และการทดสอบสถิติ T-test ค่าเฉลี่ยปริมาณ $PM_{10-2.5}$ จากทั้งสองขั้นตอนการรื้อแยกอากาศไอโรทซ์ขนาดใหญ่ พบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.2)

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของสัดส่วน $PM_{2.5}/PM_{10}$ ที่พบระหว่างขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน และการทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดใหญ่ พบว่ามีค่า 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ ส่วนไอโรทซ์ขนาดเล็กมีค่า 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.3) ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของสัดส่วน $PM_{10-2.5}/PM_{10}$ ที่พบระหว่างขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนและการทบทวนอากาศไอโรทซ์ขนาดใหญ่มีค่า 0.4 และ 0.3 ส่วนไอโรทซ์ขนาดเล็กมีค่า 0.5 และ 0.3 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.3) สังเกตได้ว่าจากขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนและการทบทวนอากาศไอโรทซ์ทั้ง 2 ขนาดนั้นมีการปลดปล่อยปริมาณ $PM_{2.5}$ มากกว่า $PM_{10-2.5}$ และมีความเป็นไปได้ว่า $PM_{2.5}$ ที่ตรวจพบในการศึกษาครั้งนี้มีแหล่งกำเนิดขั้นตอนการทบทวนมากกว่าขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน เนื่องจากขั้นตอนทบทวนมีการตัดหัวหลอดรังสีภาพคาโทดที่ทำให้เกิดการฟุ้ง

กระจายของก๊าซ และจอก๊าซที่ภายในฉาบด้วยสารเรืองแสงเมื่อมีการกระแทกหรือเสียดสีแล้วจะสามารถฟุ้งกระจายได้ ในขณะที่ขั้นตอนในการแยกชิ้นส่วนนั้นมีเพียงการแกะ ถอดชิ้นส่วนต่างๆ ออกจากกันเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสัดส่วนระหว่าง $PM_{2.5}/PM_{10}$ ที่พบค่าในขั้นตอนการขั้นตอนทุบจอบมากกว่าขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน (ดังรูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.3 สัดส่วนระหว่าง $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ กับ PM_{10} จากแต่ละขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรทัศน์

4.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักในอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร ($PM_{2.5}$) และระหว่าง 2.5 – 10 ไมโครเมตร ($PM_{10-2.5}$)

ผลความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-MS ซึ่งแยกผลการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน คือ ตลอดการรื้อแยกซากโทรทัศน์ และแยกขั้นตอนการรื้อแยกซากโทรทัศน์

4.3.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิด ได้แก่ สารหนู แบเรียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี ใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ โดยแบ่งเป็นซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก (ขนาด 14 นิ้ว) จำนวน 15 เครื่อง และขนาดใหญ่ (ขนาด 21 นิ้ว) จำนวน 15 เครื่อง โดยแสดงความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ในภาคผนวก ง พบว่าความเข้มข้นของสารหนู แบเรียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีใน $PM_{2.5}$ จากซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมีค่าระหว่าง 16.23 – 234.40 $\mu\text{g/g}$, 0.303 – 6.051 mg/g , ND, 0.604 – 23.85 $\mu\text{g/g}$,

0.001 – 0.223 mg/g, 0.320 – 2.278 mg/g, 0.129 – 1.887 mg/g, 0.013 – 1.198 mg/g, 2.161 – 24.49 mg/g, 0.026 – 298.08 µg/g และ 3.718 – 23.96 mg/g ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.4) สำหรับความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิดดังกล่าวใน PM_{10-2.5} จากซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมีค่าระหว่าง 1.061 – 90.41 µg/g, 0.378 – 14.50 mg/g, ND, 0.001 – 31.54 µg/g, 0.002 – 1.572 mg/g, 0.031 – 8.651 mg/g, 0.049 – 6.667 mg/g, 0.018 – 2.459 mg/g, 1.991 – 74.80 mg/g, 2.035 – 451.80 µg/g, 1.225 – 570.73 mg/g ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.4)

เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก มาทดสอบสถิติ T-test พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารหนูใน PM_{2.5} มากกว่าใน PM_{10-2.5} อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ในขณะที่ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของแบเรียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสีใน PM_{10-2.5} มากกว่าใน PM_{2.5} อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) และค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแคดเมียม และพลวงนั้นไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4) แนวโน้มดังกล่าวอาจเป็นผลจากอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันมีสามารถในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดต่างกัน (Fang et al., 2013)

จากผลความเข้มข้นของโลหะหนักดังกล่าวจะสังเกตได้ว่าความเข้มข้นของตะกั่ว และสังกะสีใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} มีความเข้มข้นสูงกว่าโลหะหนักอื่นๆ อย่างชัดเจน เนื่องจากตะกั่วและสังกะสีเป็นโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุที่เป็นแก้ว ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบในโทรทัศน์นั้นมีน้ำหนักมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 57 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ (กองประเมินผลกระทบต่อสุขภาพ, 2558) ในขณะที่ความเข้มข้นของเบริลเลียมมีค่า Non-detectable (ND) คือ มีความเข้มข้นต่ำกว่า LOD ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Ansems, Gijlswijk, and Huisman (2002) ที่พบว่าเบริลเลียมเป็นโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบในโทรทัศน์ ซึ่งพบในชิ้นส่วนแผ่นวงจรพิมพ์แต่เมื่อมีการเก็บตัวอย่างการปลดปล่อยโลหะหนักระหว่างกระบวนการรื้อแยกแล้วนั้นไม่พบการปลดปล่อยสู่อากาศ น้ำ ดิน และซากที่เหลือจากการรื้อแยก

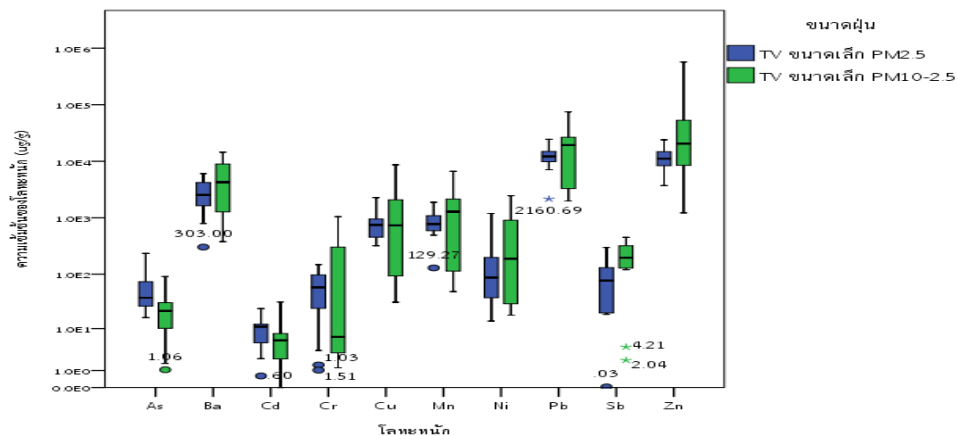
ส่วนความเข้มข้นของสารหนู แบเรียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีใน PM_{2.5} จากซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มีค่าระหว่าง 1.608 – 103.48 µg/g, 1.580 – 17.44 mg/g, ND, 0.995 – 44.80 µg/g, 0.004 – 3.306 mg/g, 0.017 – 5.137 mg/g, 0.285 – 3.219 mg/g, 0.009 – 1.709 mg/g, 5.148 – 65.58 mg/g, 45.12 – 1,428.3 µg/g และ 0.958 – 20.22 mg/g ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.4) ขณะที่ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิดใน PM_{10-2.5} จากซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มีค่าระหว่าง 1.875 – 151.08 µg/g, 0.540 – 21.80 mg/g, ND, 0.358 – 37.79 µg/g, 3.754×10^4 – 1.246 mg/g, 0.065 – 4.411 mg/g, 0.037 – 4.209 mg/g, 0.003 – 1.333 mg/g, 1.735 – 49.98 mg/g, 2.565 – 1,052.3 µg/g และ 3.582 – 32.24 mg/g ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์
ตลอดกระบวนการ

โลหะ หนัก	โทรศัพท์ขนาดเล็ก Min – max (Mean ± SD)		โทรศัพท์ขนาดใหญ่ Min – max (Mean ± SD)	
	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
As (µg/g)	16.23 – 234.40 (62.13 ± 60.73) ^a _A	1.061 – 90.41 (23.65 ± 22.04) ^b _A	1.608 – 103.46 (25.61 ± 28.46) ^a _A	1.875 – 151.08 (30.84 ± 38.38) ^a _A
Ba (mg/g)	0.303 – 6.051 (2.968 ± 1.720) ^a _A	0.378 – 14.501 (5.761 ± 4.975) ^b _A	1.580 – 17.442 (6.445 ± 4.931) ^b _B	0.540 – 21.795 (8.446 ± 6.583) ^a _A
Be	ND	ND	ND	ND
Cd (µg/g)	0.604 – 23.85 (10.023 ± 6.216) ^a _A	0.001 – 31.54 (7.556 ± 7.999) ^a _A	0.995 – 44.80 (10.28 ± 12.99) ^a _A	0.358 – 37.79 (8.209 ± 10.50) ^a _A
*Cr (mg/g)	0.001 – 0.223 (0.094 ± 0.073) ^a _A	0.002 – 1.572 (0.300 ± 0.494) ^b _A	0.004 – 3.306 (0.565 ± 0.876) ^b _B	3.754 × 10 ⁻⁴ – 1.246 (0.270 ± 0.433) ^a _A
Cu (mg/g)	0.320 – 2.278 (0.848 ± 0.537) ^a _A	0.031 – 8.651 (1.780 ± 2.594) ^b _A	0.017 – 5.137 (1.003 ± 1.347) ^a _A	0.065 – 4.411 (1.717 ± 1.351) ^a _A
Mn (mg/g)	0.129 – 1.887 (0.865 ± 0.410) ^a _A	0.049 – 6.667 (1.762 ± 2.042) ^b _A	0.285 – 3.219 (0.867 ± 0.775) ^a _A	0.037 – 4.209 (1.139 ± 1.107) ^a _A
Ni (mg/g)	0.013 – 1.198 (0.240 ± 0.353) ^a _A	0.018 – 2.459 (0.577 – 0.757) ^a _A	0.009 – 1.709 (0.271 ± 0.486) ^a _A	0.003 – 1.333 (0.237 ± 0.401) ^b _B
Pb (mg/g)	2.161 – 24.486 (12.934 ± 5.707) ^a _A	1.991 – 74.798 (21.914 ± 20.758) ^b _A	5.148 – 65.583 (23.00 ± 16.75) ^b _B	1.735 – 49.98 (20.70 ± 14.10) ^a _A
Sb (µg/g)	0.026 – 298.08 (89.87 ± 84.78) ^a _A	2.035 – 451.80 (209.87 ± 128.09) ^a _A	45.12 – 1,428.3 (415.04 ± 425.86) ^b _B	2.565 – 1,052.3 (201.01 ± 270.79) ^a _A
Zn (mg/g)	3.718 – 23.96 (11.78 ± 5.520) ^a _A	1.225 – 570.73 (65.66 ± 147.47) ^b _A	0.958 – 20.22 (9.944 ± 6.192) ^a _A	3.582 – 32.24 (16.17 ± 10.45) ^b _A

หมายเหตุ : a, b อักษรมุมขวาด้านที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างขนาดฝุ่นที่ต่างกันจากกลุ่มทีวี
ที่มีขนาดเท่ากัน

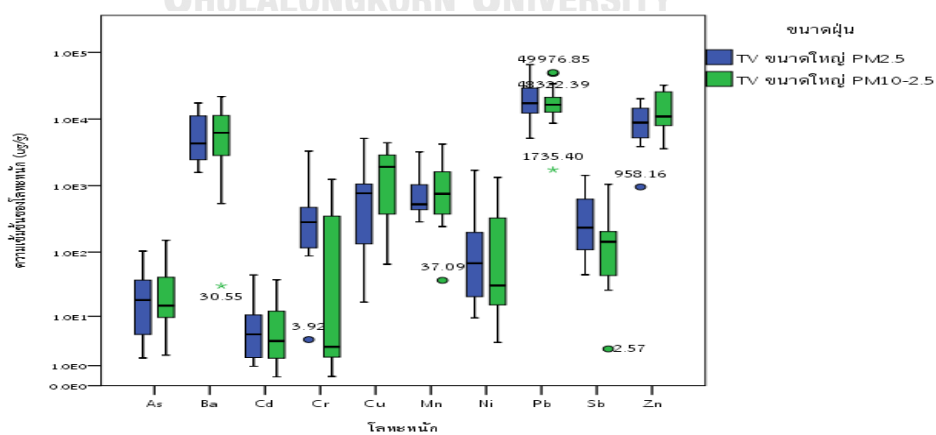
A, B อักษรมุมขวาล่างที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างฝุ่นขนาดเดียวกันที่เกิดจากทีวี
ที่มีขนาดต่างกัน



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการรื้อแยก
ซากโทรทัศน์ขนาดเล็กตลอดกระบวนการ

เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ มาทดสอบสถิติ T-test พบว่า มีเพียงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสังกะสีที่ใน $PM_{10-2.5}$ มากกว่าใน $PM_{2.5}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ในขณะที่โลหะหนักอื่นๆ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5)

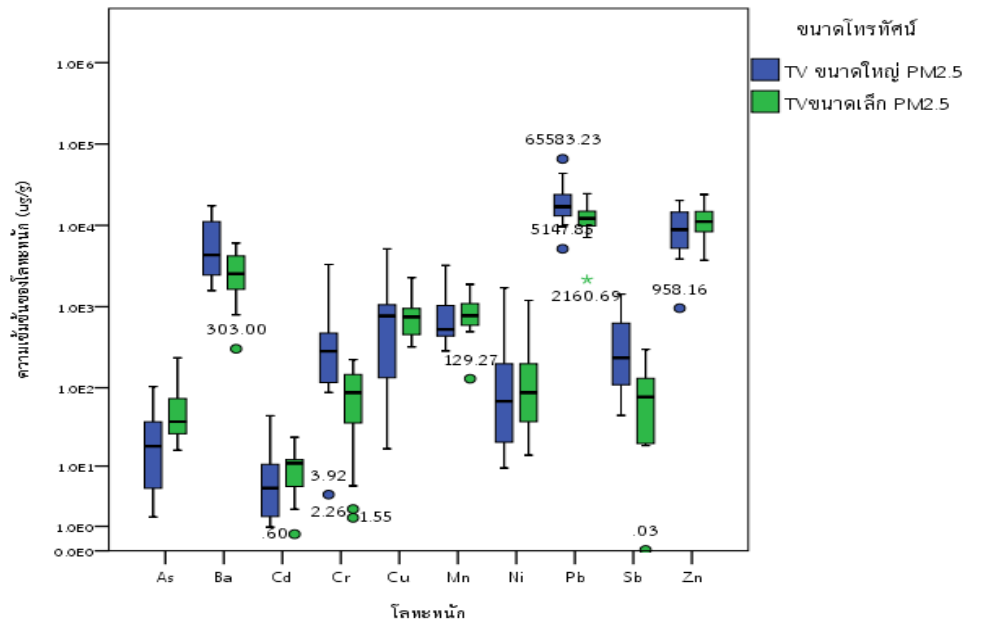
เมื่อพิจารณาผลความเข้มข้นของโลหะหนักพบว่าตะกั่วและสังกะสีมีค่าสูงกว่าโลหะหนักอื่นๆ อย่างชัดเจน เช่นเดียวกับการรื้อซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก เนื่องจากโทรทัศน์ขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่จะมีแก้วเป็นองค์ประกอบที่มีน้ำหนักมากที่สุดเหมือนกัน (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2563) รวมถึงความเข้มข้นของเบริลเลียมที่มีค่า ND ซึ่งผลดังกล่าวมีแนวโน้มไปในทิศทางเช่นเดียวกันกับการศึกษาก่อนหน้าของ Ansems et al. (2002) และความเข้มข้นของโลหะหนักในการรื้อแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก



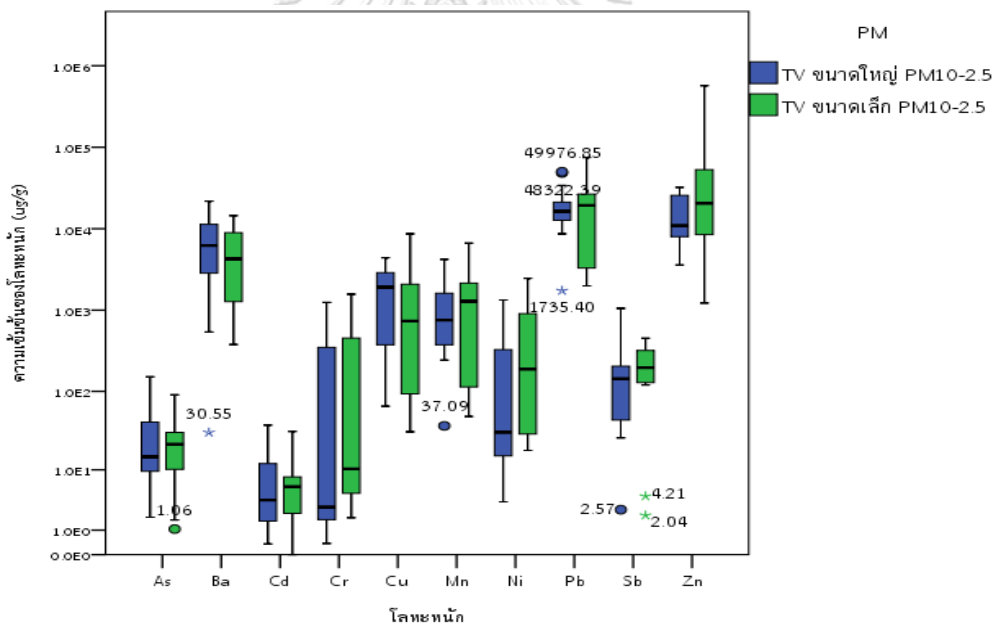
รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการรื้อแยก
ซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ตลอดกระบวนการ

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดใน $PM_{2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก มาทดสอบสถิติ T-test พบว่าความเข้มข้นของแบเรียมโครเมียม ตะกั่ว และพลวงจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่มีค่ามากกว่าความเข้มข้นของโลหะหนักดังกล่าวจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดเล็ก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของ Nnorom, Osibanjo, and Ogwuegbu (2011) ที่ได้นำวัสดุชิ้นส่วนหลอดภาพรังสีคาโทด มาชั่งน้ำหนัก แล้วพบว่าน้ำหนักของตะกั่วออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของหลอดภาพรังสีคาโทดใหญ่ขึ้น จึงอาจสรุปได้ว่าความเข้มข้นของโลหะหนักดังกล่าวใน $PM_{2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่มีค่าความเข้มข้นมากกว่าซากโทรศัพท์ขนาดเล็ก ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนู แคดเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล และสังกะสีไม่มีความแตกต่างทางสถิติ และความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดใน $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก พบว่ามีเพียงความเข้มข้นของนิกเกิลเท่านั้นที่มีค่าจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่มากกว่าขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับข้อมูลข้างต้น ในขณะที่ความเข้มข้นของโลหะหนักส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ อาจมีสาเหตุเนื่องจากซากโทรศัพท์ที่นำมารื้อแยกไม่ได้มีขนาดที่ต่างกันจนทำให้เกิดความเข้มข้นของโลหะหนักที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อีกทั้งก่อนการรื้อแยกไม่ได้มีการทำความสะอาดซากโทรศัพท์จึงอาจมีอนุภาคอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการทดลองได้

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดใน $PM_{2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก มาทดสอบสถิติ T-test พบว่าความเข้มข้นของแบเรียมโครเมียม ตะกั่ว และพลวงจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่มีค่ามากกว่าความเข้มข้นของโลหะหนักดังกล่าวจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดเล็ก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของ Nnorom et al. (2011) ที่ได้นำวัสดุชิ้นส่วนหลอดภาพรังสีคาโทด มาชั่งน้ำหนัก แล้วพบว่าน้ำหนักของตะกั่วออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของหลอดภาพรังสีคาโทดใหญ่ขึ้น จึงอาจสรุปได้ว่าความเข้มข้นของโลหะหนักดังกล่าวใน $PM_{2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่มีค่าความเข้มข้นมากกว่าซากโทรศัพท์ขนาดเล็ก ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนู แคดเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล และสังกะสีไม่มีความแตกต่างทางสถิติ และความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดใน $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก พบว่ามีเพียงความเข้มข้นของนิกเกิลเท่านั้นที่มีค่าจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์ขนาดใหญ่มากกว่าขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับข้อมูลข้างต้น ในขณะที่ความเข้มข้นของโลหะหนักส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ อาจมีสาเหตุเนื่องจากซากโทรศัพท์ที่นำมารื้อแยกไม่ได้มีขนาดที่ต่างกันจนทำให้เกิดความเข้มข้นของโลหะหนักที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อีกทั้งก่อนการรื้อแยกไม่ได้มีการทำความสะอาดซากโทรศัพท์จึงอาจมีอนุภาคอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการทดลองได้



ก) PM_{2.5}



ข) PM_{10-2.5}

รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ

4.3.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์เฉลี่ยต่อ 1 เครื่องแบบแยกชิ้นตอน

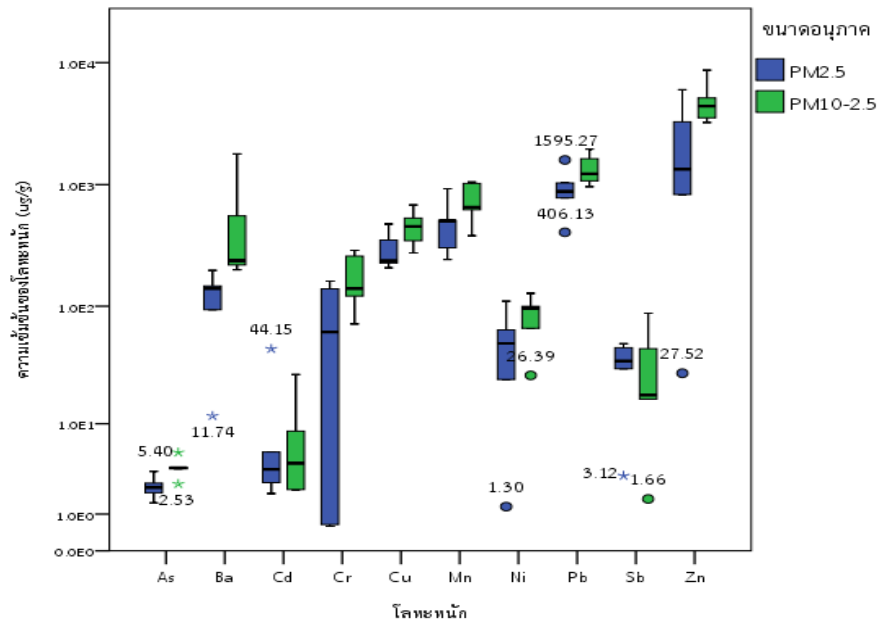
ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิด ได้แก่ สารหนู แบริียม แบเรียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี ใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน และการทุบจ่อ โดยแบ่งเป็นซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก (ขนาด 14 นิ้ว) จำนวน 10 ตัวอย่าง และขนาดใหญ่ (ขนาด 21 นิ้ว) จำนวน 10 ตัวอย่าง ซึ่งใน 1 ตัวอย่างได้ทำการรื้อแยกซากโทรทัศน์จำนวนรวม 3 เครื่อง เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเฉลี่ยเป็นรายเครื่อง ได้แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ในภาคผนวก จ พบว่าความเข้มข้นของสารหนู แบริียม แบเรียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีใน $PM_{2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมีค่าระหว่าง 1.471 – 3.477, 11.74 – 197.51, ND, 1.944 – 44.16, 0.590 – 161.25, 207.18 – 474.69, 242.98 – 925.42, 1.304 – 109.90, 406.13 – 1,595.3, 3.122 – 48.80 และ 27.05 – 6,003.7 $\mu\text{g/g}$ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.5) สำหรับความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิดดังกล่าวใน $PM_{10-2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมีค่าระหว่าง 2.533 – 5.396, 199.72 – 1,785.1, ND, 2.172 – 26.87, 71.15 – 288.67, 275.47 – 681.56, 380.57 – 1,052.7, 26.39 – 127.79, 963.76 – 1,954.2, 1.659 – 87.58 และ 3,234.2 – 8,665.1 $\mu\text{g/g}$ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.5) เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมาทดสอบสถิติ T-test โลหะหนักทั้ง 10 ชนิดไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7ก)

จากตารางที่ 4.5 พบความเข้มข้นของสารหนู แบริียม แบเรียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีเฉลี่ยรายเครื่องใน $PM_{2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มีค่าระหว่าง 0.223 – 16.33, 12.34 – 57.36, ND, 0.303 – 1.951, 0.449 – 163.83, 19.06 – 398.58, 1.756 – 533.79, 1.371 – 77.75, 1.908 – 922.42, 0.157 – 39.91 และ 16.59 – 4,177.0 $\mu\text{g/g}$ ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิดดังกล่าวใน $PM_{10-2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มีค่าระหว่าง 1.022 – 5.880, 66.73 – 891.56, ND, 1.010 – 3.075, 33.70 – 166.95, 180.86 – 590.15, 321.01 – 1,427.1, 1.271 – 151.28, 186.78 – 1,467.6 และ 1,436.1 – 5,640.4 $\mu\text{g/g}$ ตามลำดับ เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มาทดสอบสถิติ T-test พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนู และแบเรียมใน $PM_{10-2.5}$ มากกว่าใน $PM_{2.5}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ในขณะที่โลหะหนักอื่นๆ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7ข)

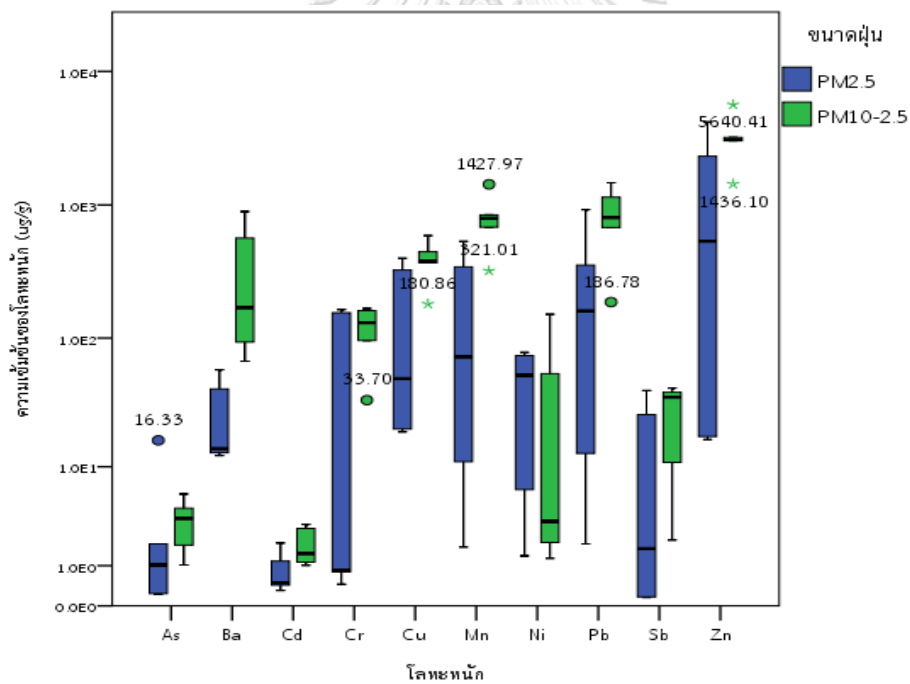
ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการแยกชิ้นส่วนซาก
โทรทัศน์เฉลี่ยต่อ 1 เครื่อง

โลหะ หนัก	โทรทัศน์ขนาดเล็ก (µg/g)		โทรทัศน์ขนาดใหญ่ (µg/g)	
	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
	Min – max (Mean ± SD)	Min – max (Mean ± SD)	Min – max (Mean ± SD)	Min – max (Mean ± SD)
As	1.471 – 3.477 (2.366 ± 0.746) ^a _A	2.533 – 5.396 (3.852 ± 1.019) ^a _A	0.223 – 16.33 (3.944 ± 0.746) ^a _B	1.022 – 5.880 (3.327 ± 1.947) ^b _A
Ba	11.74 – 197.51 (117.98 ± 68.87) ^a _A	199.72 – 1,785.1 (599.32 ± 678.79) ^a _A	12.34 – 57.34 (27.55 ± 20.51) ^a _A	66.73 – 891.56 (357.07 ± 359.66) ^b _A
Be	ND	ND	ND	ND
Cd	1.944 – 44.16 (11.57 ± 18.27) ^a _A	2.172 – 26.87 (8.802 ± 10.43) ^a _A	0.303 – 1.951 (0.868 ± 0.691) ^a _B	1.010 – 3.075 (1.894 ± 0.971) ^a _A
*Cr	0.590 – 161.25 (72.58 ± 75.50) ^a _A	71.15 – 288.67 (176.09 ± 93.40) ^a _A	0.449 – 163.83 (64.23 ± 87.05) ^a _A	33.70 – 166.94 (117.64 ± 54.77) ^a _A
Cu	207.18 – 474.69 (299.26 ± 112.86) ^a _A	275.47 – 681.56 (457.88 ± 159.08) ^a _A	19.062 – 398.58 (162.53 ± 184.41) ^a _A	180.86 – 590.15 (393.63 ± 147.84) ^a _A
Mn	242.98 – 925.42 (496.93 ± 267.40) ^a _A	380.57 – 1,052.7 (746.25 ± 286.62) ^a _A	1.756 – 533.79 (192.48 ± 236.21) ^a _A	321.01 – 1,427.1 (814.08 ± 399.54) ^a _A
Ni	1.304 – 109.90 (49.64 ± 41.22) ^a _A	26.39 – 127.79 (83.27 ± 38.68) ^a _A	1.371 – 77.75 (42.267 ± 36.39) ^a _A	1.271 – 151.28 (42.30 ± 64.88) ^a _A
Pb	406.13 – 1,595.3 (938.30 ± 433.84) ^a _A	963.76 – 1,954.2 (1,370.0 ± 413.29) ^a _A	1.908 – 922.42 (290.16 ± 381.02) ^a _A	186.78 – 1,467.6 (856.10 ± 484.54) ^a _A
Sb	3.122 – 48.80 (32.39 ± 18.03) ^a _A	1.659 – 87.58 (33.59 ± 33.87) ^a _A	0.157 – 39.91 (13.58 ± 18.36) ^a _A	2.109 – 41.63 (25.73 ± 17.98) ^a _A
Zn	27.05 – 6,003.7 (2,294.4 ± 2,392.9) ^a _A	3,234.2 – 8,665.1 (4,995.5 ± 2,184.1) ^a _A	16.59 – 4,177.0 (1,412.9 ± 1,811.8) ^a _A	1,436.1 – 5,640.4 (3,275.7 ± 1,507.1) ^a _A

หมายเหตุ : a, b อักษรมุมขวามือที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างขนาดฝุ่นที่ต่างกันจากกลุ่มทีวีที่มีขนาดเท่ากัน
A, B อักษรมุมขวาล่างที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างฝุ่นขนาดเดียวกันที่เกิดจากทีวีที่มีขนาดต่างกัน



ก) โทรทัศน์ขนาดเล็ก



ข) โทรทัศน์ขนาดใหญ่

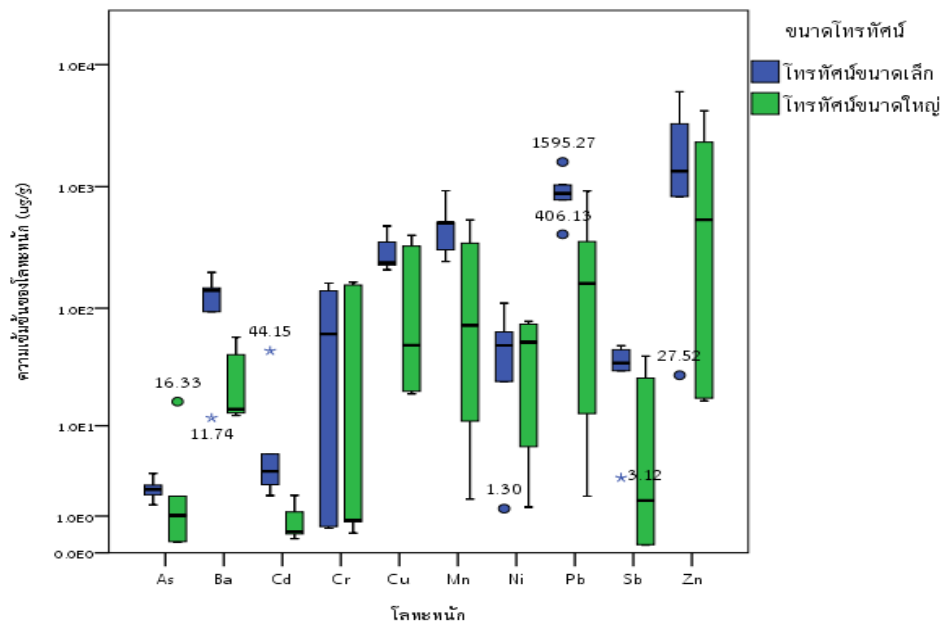
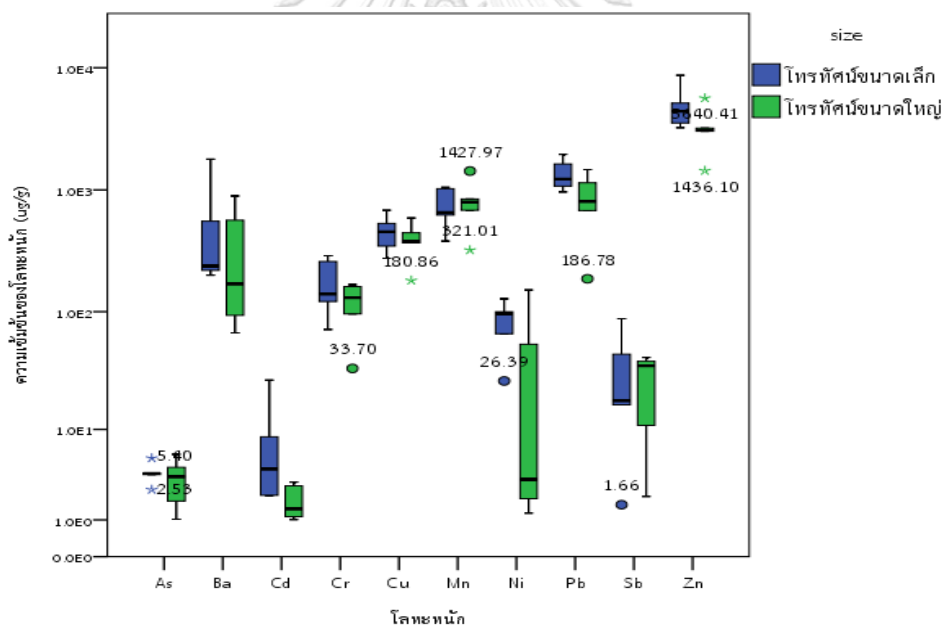
รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์

เมื่อพิจารณาผลความเข้มข้นของโลหะหนัก พบว่าความเข้มข้นของเบริลเลียมมีค่า ND เช่นเดียวกับผลการศึกษาจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ ส่วนสังกะสีเป็นโลหะหนักที่มีค่าความเข้มข้นสูงที่สุด รองลงมาคือตะกั่วทั้งใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} โดยเฉพาะในตัวอย่างที่ 3 ที่

เป็นซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก และตัวอย่างที่ 9 ที่เป็นซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ ซึ่งในขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ทั้ง 2 ตัวอย่างนี้มีตัวอย่างซากโทรทัศน์รุ่นเก่าที่มีปุ่มกดด้านข้างหน้าจอและภายในมีแผงควบคุมปุ่มกดด้วยเป็นหนึ่งในตัวอย่างด้วย ในขณะที่ตัวอย่างอื่นๆ ไม่มี จึงอาจเป็นสาเหตุให้ผลความเข้มข้นของโลหะหนักสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ เนื่องจากชิ้นส่วนต่างๆ ภายในโทรทัศน์อาจเปลี่ยนแปลงไปตามยี่ห้อ รุ่น และปีที่ผลิต Nnorom et al. (2011) และจากการศึกษาของ Yu, Tian, Wu, Zhe, and Lei (2015) พบว่าในอดีตกการผลิต panel glass ที่เป็นกระจกส่วนหน้าของจอโทรทัศน์ ซึ่งมีน้ำหนักคิดเป็น 2/3 ของน้ำหนักหลอดภาพรังสีคาโทดนั้น มีตะกั่วออกไซด์เป็นส่วนประกอบ แต่ปัจจุบันไม่พบตะกั่วจากชิ้นส่วนดังกล่าวแล้ว

ผลการทดสอบสถิติ T-test ระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ จากขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ (ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8ก) พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูจากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มีมากกว่าขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ซึ่งตรงข้ามกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของโครเมียมที่พบจากซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ส่วนโลหะหนักอื่นๆ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ และผลการทดสอบสถิติดังกล่าวใน $PM_{10-2.5}$ (ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8ข) พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 10 ชนิดไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดของโทรทัศน์นั้นไม่ได้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโลหะหนักส่วนใหญ่อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากส่วนประกอบบางชิ้นภายในโทรทัศน์ไม่ได้มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามขนาดของโทรทัศน์ (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2563)

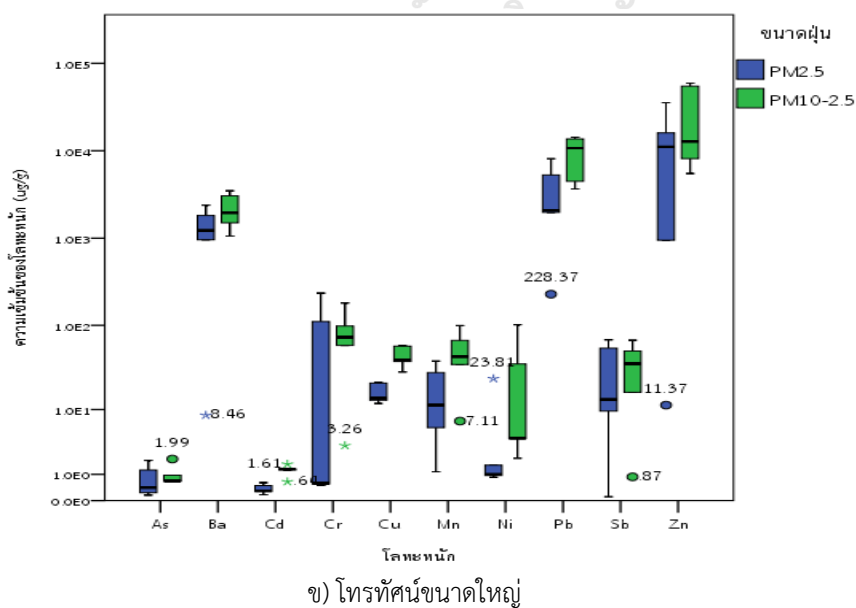
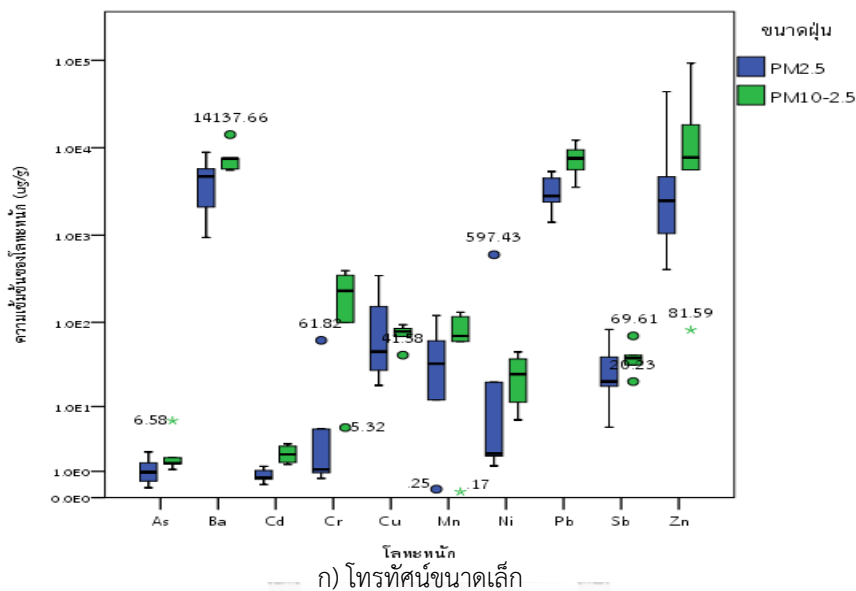
สำหรับผลการศึกษาความเข้มข้นของสารหนู แบเรียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีเฉลี่ยรายเครื่องใน $PM_{2.5}$ จากการทบทวจซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมีค่าระหว่าง 0.298 – 2.326 $\mu\text{g/g}$, 939.67 – 8,888.3 mg/g, ND, 0.412 – 1.278 $\mu\text{g/g}$, 0.658 – 61.82 $\mu\text{g/g}$, 18.22 – 344.44 $\mu\text{g/g}$, 0.250 – 119.55 $\mu\text{g/g}$, 1.311 – 597.43 $\mu\text{g/g}$, 1,403.9 – 5,345.4 mg/g, 5.396 – 82.76 $\mu\text{g/g}$ และ 404.44 – 43,792.1 mg/g ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.6) ส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิดดังกล่าวใน $PM_{10-2.5}$ จากการทบทวจซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมีค่าระหว่าง 1.098 – 6.584 $\mu\text{g/g}$, 5,562.477 – 14,137.7 mg/g, ND, 1.395 – 3.119 $\mu\text{g/g}$, 5.322 – 391.61 $\mu\text{g/g}$, 41.58 – 93.75 $\mu\text{g/g}$, 0.167 – 130.69 $\mu\text{g/g}$, 6.743 – 45.29 $\mu\text{g/g}$, 3,534.8 – 12,247.2 mg/g, 20.23 – 69.61 $\mu\text{g/g}$, 81.59 – 93,160.3 mg/g ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.6) เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการทบทวจซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมาทดสอบสถิติ T-test พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของของโครเมียมและทองแดงใน $PM_{10-2.5}$ มากกว่าใน $PM_{2.5}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ในขณะที่โลหะหนักอื่นๆ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9ก)

ก) PM_{2.5}ข) PM_{10-2.5}

รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการแยกชิ้นส่วนซากโพรทิตส์

จากตารางที่ 4.6 พบความเข้มข้นของสารหนู แบเรียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีเฉลี่ยรายเครื่องใน PM_{2.5} จากการทุบจอบซากโพรทิตส์ขนาดใหญ่มีค่าระหว่าง 0.153 – 1.888 µg/g, 8.460 – 2,392.8 mg/g, ND, 0.170 – 0.602 µg/g, 0.493 – 234.49 µg/g, 11.89 – 21.47 µg/g, 1.142 – 38.35 µg/g, 0.855 – 23.81 µg/g, 228.3 – 8,097.9 mg/g, 0.108 – 68.10 µg/g และ 11.37 – 35,435.6 mg/g ตามลำดับ

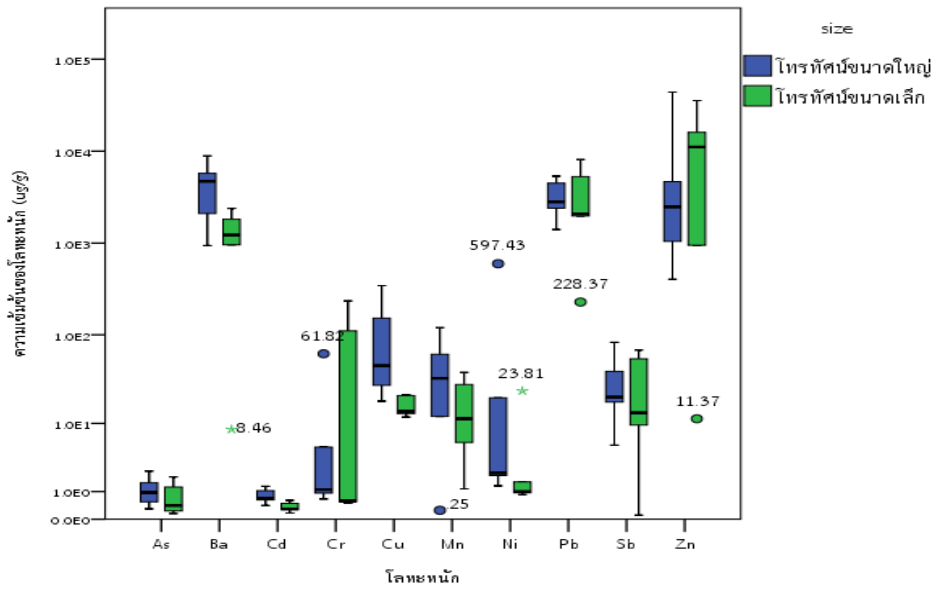
สำหรับความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 11 ชนิดดังกล่าวใน $PM_{10-2.5}$ จากการทบทวนจลาจลโทรทัศนขนาดใหญ่มีค่าระหว่าง 0.657 – 1.990 $\mu\text{g/g}$, 1,058.9 – 3,482.8 mg/g , ND, 0.644 – 1.614 $\mu\text{g/g}$, 3.261 – 180.43 $\mu\text{g/g}$, 28.51 – 57.97 $\mu\text{g/g}$, 7.109 – 99.22 $\mu\text{g/g}$, 2.051 – 101.78 $\mu\text{g/g}$, 3,657.1 – 14,312.8 mg/g , 0.868 – 67.32 $\mu\text{g/g}$ และ 81.59 – 93,160.3 mg/g ตามลำดับ เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการทบทวนจลาจลโทรทัศนขนาดใหญ่มาทดสอบสถิติ T-test พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของของทองแดง และสังกะสีใน $PM_{10-2.5}$ มากกว่าใน $PM_{2.5}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ในขณะที่โลหะหนักอื่นๆ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9ข)



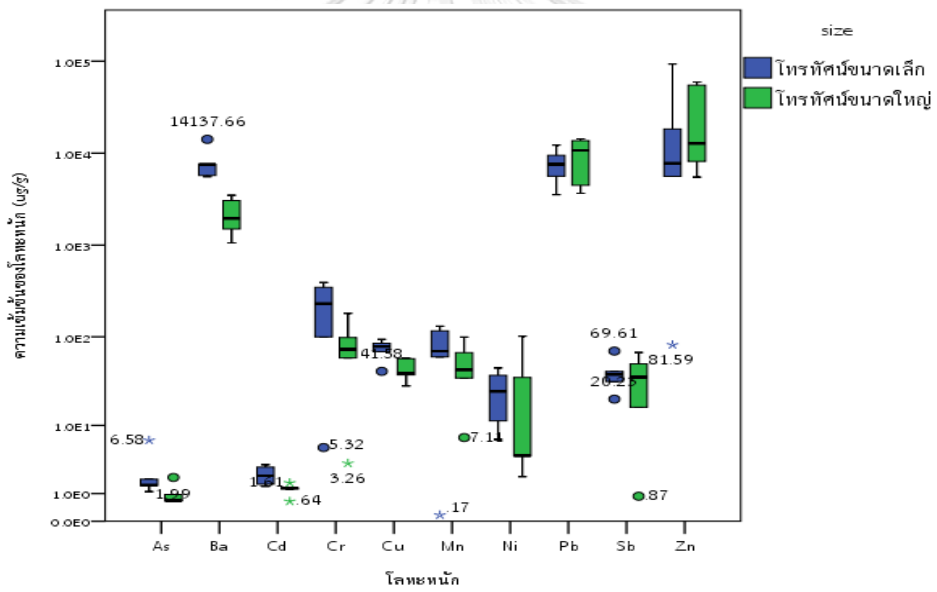
รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการทบทวนจลาจลโทรทัศน

เมื่อพิจารณาผลความเข้มข้นของโลหะหนักดังกล่าว พบว่าความเข้มข้นของเบริลเลียมมีค่า ND เช่นเดียวกับผลการศึกษาจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการและขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน ส่วนสังกะสีเป็นโลหะหนักที่มีค่าความเข้มข้นสูงที่สุดใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ โดยเฉพาะในตัวอย่าง 3 ที่เป็นซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก ซึ่งขณะทำการทุบจอนั้นเกิดการระเบิดของหลอดภาพรังสีคาโทด ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของสารเคลือบที่มีซัลไฟด์ของสังกะสีเป็นองค์ประกอบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) และจากการสังเกตตัวอย่าง 9 ที่เป็นซากโทรทัศน์รุ่นเก่าขนาดใหญ่ พบว่าความหนาของจอแก้วและสารเคลือบมีความหนามากกว่าตัวอย่างอื่นๆ จึงอาจเป็นสาเหตุให้ทั้ง 2 ตัวอย่างดังกล่าวมานั้นมีค่าความเข้มข้นของสังกะสีสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.9 พบว่าโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงรองลงมา คือ ตะกั่ว เนื่องจากตะกั่วและสังกะสีเป็นโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบหลักในจอแก้ว (กองประเมินผลกระทบต่อสุขภาพ, 2558)

ผลการทดสอบสถิติ T-test ระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ จากขั้นตอนการทุบจอซากโทรทัศน์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของโครเมียมจากการทุบจอซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มีมากกว่าขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ($p = 0.05$) ในขณะที่ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของทองแดง และนิกเกิลที่พบจากซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.05$) ส่วนโลหะหนักอื่นๆ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ และผลการทดสอบสถิติดังกล่าวใน $PM_{10-2.5}$ พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 10 ชนิดไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.10) ซึ่งไม่สอดคล้องตามการศึกษา Nnorom et al. (2011) และการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ ที่พบว่าปริมาณของตะกั่วออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของหลอดภาพรังสีคาโทดใหญ่ขึ้น ผลการศึกษาที่แตกต่างกับการศึกษาครั้งนี้อาจมีสาเหตุจากจำนวนตัวอย่างที่จำกัด และขนาดของโทรทัศน์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่มีขนาดไม่ต่างกันพอที่จะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของโลหะหนักตามขนาดของโทรทัศน์ได้อย่างชัดเจน



ก) PM_{2.5}



ข) PM_{10-2.5}

รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการทูปจอกซากโทรที่ศน์

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการทุบจอบซากโทรทัศน์เฉลี่ยต่อ 1 เครื่องแบบแยกขั้นตอน

โลหะหนัก	โทรทัศน์ขนาดเล็ก		โทรทัศน์ขนาดใหญ่	
	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
	Min – max (Mean ± SD)	Min – max (Mean ± SD)	Min – max (Mean ± SD)	Min – max (Mean ± SD)
As (µg/g)	0.298 – 2.326 (1.124 ± 0.811) ^a _A	1.098 – 6.584 (2.489 ± 2.305) ^a _A	0.153 – 1.888 (0.783 ± 0.753) ^a _A	0.657 – 1.990 (0.991 ± 0.572) ^a _A
Ba (mg/g)	0.940 – 8.888 (4.477 ± 3.135) ^a _A	5.562 – 14.138 (8.110 ± 3.504) ^a _A	0.008 – 2.393 (1.281 ± 0.910) ^a _A	1.059 – 3.483 (2.211 ± 1.027) ^a _A
Be	ND	ND	ND	ND
Cd (µg/g)	0.412 – 1.278 (0.808 ± 0.347) ^a _A	1.395 – 3.119 (2.207 ± 0.775) ^a _A	0.170 – 0.602 (0.364 ± 0.175) ^a _A	0.644 – 1.614 (1.221 ± 0.354) ^a _A
*Cr (µg/g)	0.658 – 61.818 (13.914 ± 26.840) ^a _A	5.322 – 391.605 (214.998 ± 162.932) ^b _A	0.493 – 234.493 (63.347 ± 103.898) ^b _B	3.261 – 180.425 (82.653 ± 64.793) ^a _A
Cu (µg/g)	18.22 – 344.44 (117.62 ± 137.65) ^a _A	41.58 – 93.75 (73.44 ± 20.01) ^a _A	11.89 – 21.47 (16.27 ± 4.63) ^a _B	28.51 – 57.97 (44.35 ± 13.00) ^b _A
Mn (µg/g)	0.250 – 119.55 (45.16 ± 47.55) ^a _A	0.167 – 130.69 (75.35 ± 51.62) ^b _A	1.142 – 38.35 (16.96 ± 15.70) ^a _A	7.109 – 99.22 (50.34 ± 34.72) ^a _A
Ni (µg/g)	1.311 – 597.43 (124.56 ± 264.46) ^a _A	6.743 – 45.29 (25.15 ± 16.51) ^a _A	0.855 – 23.81 (5.63 ± 10.17) ^a _B	2.051 – 101.78 (29.54 ± 42.72) ^a _A
Pb (mg/g)	1.404 – 5.345 (3.293 ± 1.601) ^a _A	3.535 – 12.25 (7.69 ± 3.37) ^a _A	0.228 – 8.098 (3.535 ± 3.137) ^a _A	3.657 – 14.313 (9.365 ± 5.032) ^a _A
Sb (µg/g)	5.396 – 82.76 (33.14 ± 30.31) ^a _A	20.23 – 69.61 (40.34 ± 18.28) ^a _A	0.108 – 68.10 (29.12 ± 30.15) ^a _A	0.868 – 67.32 (34.10 ± 26.40) ^a _A
Zn (mg/g)	0.404 – 43.79 (10.48 ± 18.70) ^a _A	0.082 – 93.16 (24.97 ± 38.69) ^a _A	0.011 – 35.44 (12.71 ± 14.40) ^a _A	0.082 – 93.16 (30.18 ± 32.77) ^b _A

หมายเหตุ : a, b อักษรมุมขวาด้านบนที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างขนาดฝุ่นที่ต่างกันจากกลุ่มทีวีที่มีขนาดเท่ากัน

A, B อักษรมุมขวาล่างที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างฝุ่นขนาดเดียวกันที่เกิดจากทีวีที่มีขนาดต่างกัน

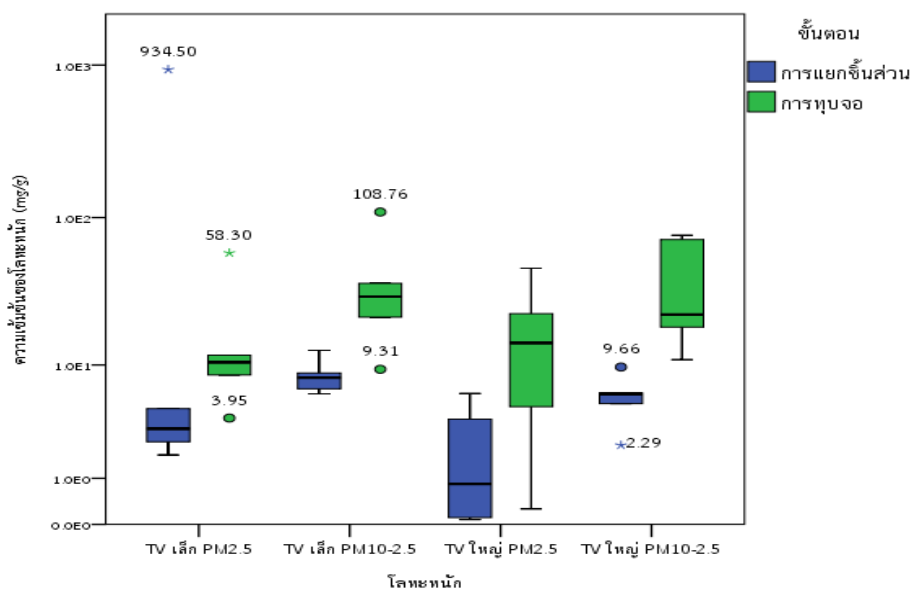
เมื่อคำนวณผลรวมความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 10 ชนิด พบว่าใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการรื้อแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก มีค่าระหว่าง 1.844 – 9.345 และ 6.123 – 12.71 mg/g ตามลำดับ ส่วนผลรวมความเข้มข้นโลหะหนักรวมใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการทุบจอบซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก มีค่าระหว่าง 3.947- 58.30 และ 9.308 – 108.76 mg/g ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นโลหะหนักรวมใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการแยกชิ้นส่วน และการทุบจอบซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ มีค่าระหว่าง 0.074 - 6.159, 2.290 - 9.585, 0.264 - 46.08 และ 10.89 - 76.35 mg/g ตามลำดับ

เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักรวมระหว่างขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน และการทุบจอบซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก มาทดสอบสถิติ T-test พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของของโลหะรวมไม่มีความแตกต่างทางสถิติทั้งใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} (ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.11) ในขณะที่ผลการทดสอบสถิติดังกล่าวจากซากโทรทัศน์ใหญ่ใน พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของของโลหะรวมจากขั้นตอนการทุบจอบมีมากกว่าขั้นตอนการแยกชิ้นส่วนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ (p = 0.05) ทั้งใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} (ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.11) ซึ่งผลการทดสอบสถิติดังกล่าวในการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่เป็นไปตามสมมติฐานข้อที่ 1 ที่คาดว่าความเข้มข้นของโลหะหนักจากขั้นตอนการทุบจอบมีปริมาณสูงกว่าขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน ส่วนผลการศึกษาในซากโทรทัศน์ขนาดเล็กนั้นก็ไปในทิศทางเดียวกันกับสมมติฐานข้อที่ 1 ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักในขั้นตอนการทุบจอบมากกว่าขั้นตอนการแยกชิ้นส่วน ถึงแม้จะไม่ได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญก็ตาม

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นของโลหะหนักรวมใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 เครื่องแบบแยกชิ้นตอน

ขั้นตอน	ขนาดโทรทัศน์	ขนาดอนุภาค	Min – Max (mg/g)	Mean ± SD (mg/g)
แยก ชิ้นส่วน	ขนาดเล็ก	PM _{2.5}	1.844 – 9.345	4.284 ± 3.022 ^a
		PM _{10-2.5}	6.123 – 12.71	8.348 ± 2.580 ^a
	ขนาดใหญ่	PM _{2.5}	0.074 - 6.159	2.177 ± 2.660 ^a
		PM _{10-2.5}	2.290 - 9.585	5.819 ± 2.621 ^a
ทุบจอบ	ขนาดเล็ก	PM _{2.5}	3.947 – 58.30	18.58 ± 22.39 ^a
		PM _{10-2.5}	9.308 – 108.76	41.04 ± 39.09 ^a
	ขนาดใหญ่	PM _{2.5}	0.264 - 46.08	17.63 ± 18.11 ^b
		PM _{10-2.5}	10.92 - 76.35	39.92 ± 31.36 ^b

หมายเหตุ : a, b อักษรมุมขวาบนที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างขั้นตอนการรื้อแยกที่ต่างกัน จากกลุ่มทีวีที่มีขนาดเท่ากัน



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของโลหะหนักรวมใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 เครื่องแบบแยกชิ้นตอน

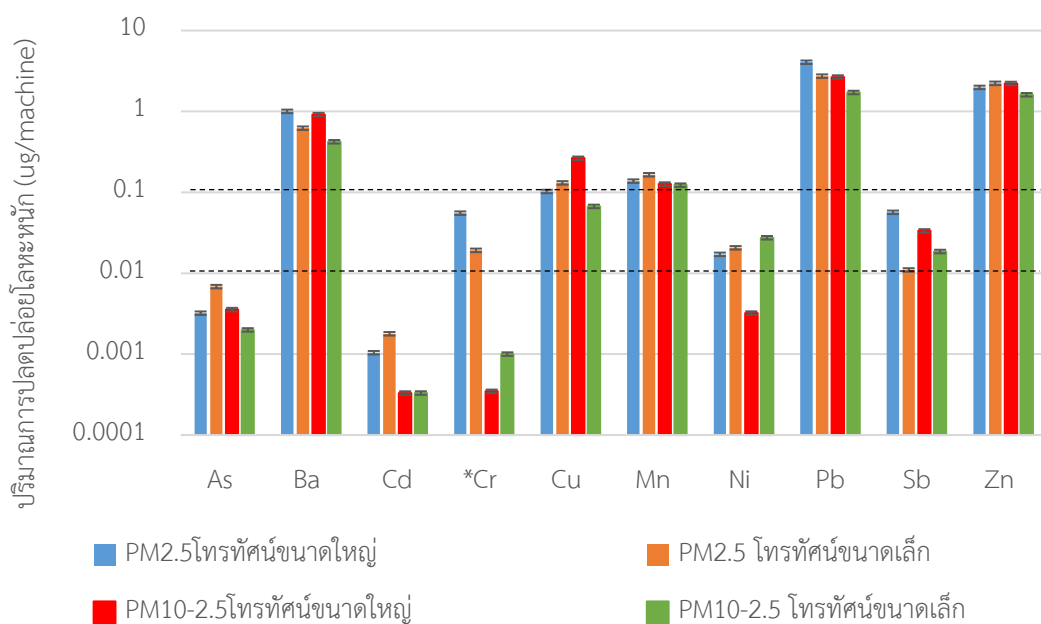
4.4 อัตราการปลดปล่อยโลหะหนัก (Emission rate)

อัตราการปลดปล่อยโลหะหนักในอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM_{2.5}) และระหว่าง 2.5 – 10 ไมโครเมตร (PM_{10-2.5}) จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตลอดกระบวนการภายใน chamber สามารถคำนวณได้จากตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษซึ่งแสดงในหน่วย “ไมโครกรัมของโลหะหนักต่อซากโทรทัศน์ 1 เครื่อง” จากสมการที่ 3.11 ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.8

เนื่องจากผลการศึกษาความเข้มข้นของเบริลเลียมในข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 แสดงค่าเป็น ND จึงไม่นำมาวิเคราะห์ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษ และผลการวิเคราะห์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงกว่าค่าเฉลี่ยตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษ ในการศึกษาครั้งนี้จึงรายงานผลการศึกษาในรูปของค่ามัธยฐานแทนการรายงานเป็นค่าเฉลี่ยตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษที่นิยมรายงานกันโดยปกติ ซึ่งพบว่าค่ามัธยฐานตัวคูณการปลดปล่อยสารหนู แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีใน PM_{2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดเล็กมีค่า 0.007, 0.621, 0.002, 0.019, 0.131, 0.165, 0.021, 2.733, 0.011 และ 2.228 µg/machine ตามลำดับ และใน PM_{10-2.5} มีค่า 0.002, 0.422, 3.308 × 10⁻⁴, 0.001, 0.067, 0.123, 0.027, 1.716, 0.019 และ 1.609 µg/machine ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.12) ในขณะที่ค่ามัธยฐานตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักดังกล่าวใน PM_{2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มีค่า 0.003, 1.003, 0.001, 0.055, 0.103, 0.138, 0.017, 4.058, 0.057 และ 1.983 µg/machine ตามลำดับ ส่วนใน PM_{10-2.5} มีค่า 0.004,

0.915, 3.308×10^{-4} , 3.474×10^{-4} , 0.264, 0.127, 0.003, 2.558, 0.032 และ $2.267 \mu\text{g}/\text{machine}$ ตามลำดับ(ดังรูปที่ 4.12) จากการสังเกตพบว่าค่ามัธยฐานตัวคูณการปลดปล่อยโครเมียมและนิกเกิลใน $\text{PM}_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของช่วงที่คำนวณได้ เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักด้วย ICP-MS โครเมียมและนิกเกิลมีค่าความเข้มข้นเป็น ND จำนวนเท่ากันคิดเป็นร้อยละ 50 ของความเข้มข้นโลหะหนักจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่ เมื่อนำมาคำนวณตัวคูณการปลดปล่อยจึงแทนค่าด้วย 0.5 เท่าของ LOD ซึ่งทุกตัวอย่างจะแทนด้วยค่าเดียวกัน จึงทำให้ค่าตัวคูณการปลดปล่อยที่คำนวณจาก ND นั้นมีค่าเท่ากัน

เมื่อพิจารณาค่ามัธยฐานตัวคูณการปลดปล่อยของโลหะหนักทั้ง 10 ชนิด พบว่าค่ามัธยฐานตัวคูณการปลดปล่อยตะกั่ว และสังกะสีใน $\text{PM}_{2.5}$ และ $\text{PM}_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ทั้ง 2 ขนาด มีค่าสูงกว่าโลหะหนักอื่นๆ (ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.12) ซึ่งเป็นไปตามความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีที่พบปริมาณสูงจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ (ผลการศึกษาข้อ 4.3.1 และ 4.3.2) และผลการศึกษาของ Ansems et al. (2002) ที่ได้ประเมินปริมาณโลหะหนักที่ปลดปล่อยจากกระบวนการกำจัดซากโทรทัศน์ในรูปแบบต่างๆ โดยหนึ่งในนั้นคือการรื้อแยก/ mechanical separation ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การปลดปล่อยทางอากาศมีส่วนทำให้เกิดการรั่วไหลของโลหะหนักโดยเฉพาะสังกะสีและตะกั่ว โดยพบการรั่วไหล (ผลรวมการปลดปล่อยทางอากาศ น้ำ และดิน) ของสังกะสีและตะกั่วสูงถึง 1.492 และ 1.800 g/ton TV set ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ค่ากลางของตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักใน $\text{PM}_{2.5}$ และ $\text{PM}_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์เฉลี่ยรายเครื่อง

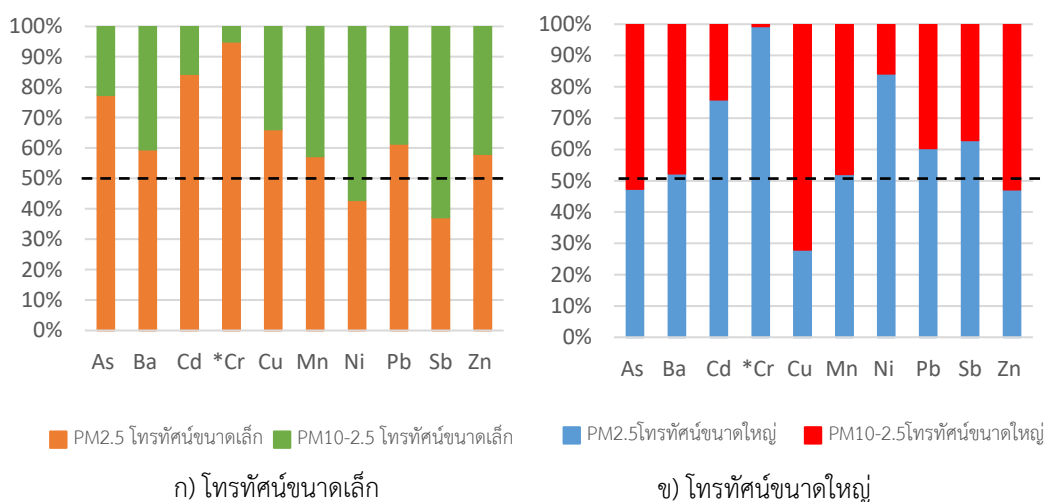
ตารางที่ 4.8 ค่าตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการรื้อแยกซากโทรศัพท์
1 เครื่อง

โลหะ หนัก	ขนาดเล็ก (µg/machine)		ขนาดใหญ่ (µg/machine)	
	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
	Min – Max (Median)	Min – Max (Median)	Min – Max (Median)	Min – Max (Median)
As	0.004 – 0.062 (0.007)	7.996×10^{-5} – 0.011 (0.002)	3.469×10^{-4} – 0.042 (0.003)	0.001 – 0.036 (0.004)
Ba	0.068 – 1.351 (0.621)	0.018 – 1.586 (0.422)	0.343 – 3.858 (1.003)	0.265 – 4.021 (0.915)
Cd	1.382×10^{-4} – 0.005 (0.002)	1.340×10^{-7} – 0.002 (3.308×10^{-4})	3.308×10^{-4} – 0.008 (0.001)	1.490×10^{-4} – 0.011 (3.308×10^{-4})
*Cr	3.474×10^{-4} – 0.083 (0.019)	3.474×10^{-4} – 0.084 (0.001)	0.001 – 0.739 (0.055)	3.474×10^{-4} – 0.113 (3.474×10^{-4})
Cu	0.029 – 0.654 (0.131)	0.006 – 1.100 (0.067)	0.006 – 1.234 (0.103)	0.030 – 0.575 (0.264)
Mn	0.029 – 0.432 (0.165)	0.005 – 0.472 (0.123)	0.062 – 0.499 (0.138)	0.034 – 0.388 (0.127)
Ni	0.003 – 0.184 (0.021)	0.003 – 0.126 (0.027)	0.003 – 0.410 (0.017)	0.003 – 0.246 (0.003)
Pb	0.486 – 5.538 (2.733)	0.151 – 3.703 (1.716)	1.116 – 15.753 (4.058)	0.812 – 8.915 (2.558)
Sb	2.367×10^{-4} – 0.081 (0.011)	2.367×10^{-4} – 0.049 (0.019)	0.010 – 0.221 (0.057)	2.367×10^{-4} – 0.134 (0.032)
Zn	0.744 – 6.525 (2.228)	0.142 – 6.928 (1.609)	0.208 – 7.807 (1.983)	0.339 – 18.11 (2.267)

หากพิจารณาค่ามัธยฐานตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนัก สามารถจัดกลุ่มตามระดับการปลดปล่อยได้ 3 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มโลหะหนักที่มีค่าตัวคูณการปลดปล่อยสูง (สูงกว่า 0.1 µg/machine) ซึ่งจัดเป็นโลหะหนักชนิดหลักที่พบในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ แบเรียม ตะกั่ว และสังกะสี โลหะเหล่านี้

เป็นส่วนประกอบในจอแก้ว และปืนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในชิ้นส่วนของโทรทัศน์ และสามารถพบได้จากแหล่งกำเนิดในสิ่งแวดล้อมทั่วไป 2) กลุ่มโลหะที่พบระดับปานกลาง (ระหว่าง 0.01 – 0.1 $\mu\text{g}/\text{machine}$) ได้แก่ ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล และพลวง โลหะหนักเหล่านี้เป็นองค์ประกอบในแผงวงจร และสายไฟ ซึ่งชิ้นส่วนนี้ไม่ได้ผ่านการบัด ย่อยในระหว่างการรีไซเคิล และ 3) เป็นกลุ่มที่มีค่าตัวคูณการปลดปล่อยระดับต่ำ (ต่ำกว่า 0.001 $\mu\text{g}/\text{machine}$) คือ สารหนู แคดเมียม และโครเมียม เป็นโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบในแผงวงจร ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ไม่ได้ผ่านการบัด ย่อยในระหว่างการรีไซเคิลเช่นกัน

จากรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาสัดส่วนตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักในอนุภาคระหว่าง $\text{PM}_{2.5}$ และ $\text{PM}_{10-2.5}$ จากซากโทรทัศน์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่โดยใช้เกณฑ์ที่ 50% พบว่าโลหะหนักเกือบทุกชนิดมีค่าตัวคูณการปลดปล่อยใน $\text{PM}_{2.5}$ มากกว่า $\text{PM}_{10-2.5}$ โดยเฉพาะโครเมียมที่มีค่าตัวคูณการปลดปล่อยในอนุภาค $\text{PM}_{2.5}$ สูงเกือบ 100% รวมถึงแบเรียม แคดเมียม แมงกานีส และตะกั่วมีสัดส่วนค่าตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักใน $\text{PM}_{2.5}$ มากกว่า $\text{PM}_{10-2.5}$ จากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์ทั้ง 2 ขนาด จึงสามารถสรุปได้ว่าการปลดปล่อยโลหะหนักส่วนใหญ่ในรูปของ $\text{PM}_{2.5}$ ที่สามารถแพร่กระจายเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจถึงถุงลมในปอด และผ่านเข้าสู่กระแสเลือดไปยังอวัยวะต่างๆ ได้ แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าการรับสัมผัสโลหะหนักที่เกิดการปลดปล่อยจากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์นั้นมีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพหรือไม่ จึงได้นำข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักใน $\text{PM}_{2.5}$ และ $\text{PM}_{10-2.5}$ ไปประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพในหัวข้อถัดไป สำหรับข้อมูลค่าตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษนั้น นำไปคำนวณอัตราการปลดปล่อยมลพิษเพื่อสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณโลหะหนักที่ถูกปลดปล่อยจากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์ในเชิงพื้นที่



รูปที่ 4.13 สัดส่วนการปลดปล่อยโลหะหนักใน $\text{PM}_{2.5}$ และ $\text{PM}_{10-2.5}$ จากการรีไซเคิลซากโทรทัศน์

หลังจากคำนวณค่าตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษไปแล้วข้างต้น จึงได้นำค่าดังกล่าวมาคำนวณอัตราการปลดปล่อยโลหะหนักจากสมการที่ 3.12 ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 โดยใช้ข้อมูลอัตราของกิจกรรมที่เกิดขึ้นจากการสอบถาม พบว่าในหนึ่งสัปดาห์แต่ละครัวเรือนจะทำการรื้อแยกซากโทรทัศน์ 1 วัน ซึ่งในแต่ละวันสามารถรื้อแยกซากโทรทัศน์ได้ประมาณ 30 เครื่อง หากนำมาคำนวณเป็นรายปี จะพบว่าแต่ละครัวเรือนมีความสามารถในการรื้อแยกซากโทรทัศน์ได้ 1,560 เครื่อง/ปี โดยในพื้นที่ที่ทำการศึกษานั้นมีผู้ประกอบการอาชีพรื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 105 ครัวเรือน (ข้อมูลจากโรงพยาบาลส่งเสริมตำบลบ้านป่าพัฒนาในปี 2562) เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาพิจารณาแล้วพบว่าในพื้นที่ศึกษานั้นมีอัตราการปลดปล่อยสารหนู แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีใน $PM_{2.5}$ มีค่า 0.53, 164.29, 0.17, 9.06, 16.80, 22.56, 2.81, 664.71, 9.29 และ 310.12 mg/year ตามลำดับ ส่วนใน $PM_{10-2.5}$ มีค่า 0.58, 149.87, 0.05, 0.05, 43.22, 20.75, 0.53, 463.15, 5.47 และ 346.98 mg/year ตามลำดับ

หากผู้ประกอบการทำการรื้อแยกซากโทรทัศน์ในอัตราเช่นนี้ ใน 1 ปีจะพบอัตราการปลดปล่อยโลหะหนักรวมใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ในพื้นที่สูงถึง 1,499.60 และ 1,166.46 mg/year ตามลำดับ ซึ่งการปลดปล่อยโลหะหนักเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ รวมถึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4.9 การปลดปล่อยโลหะหนักใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ของชุมชนในพื้นที่ศึกษา

โลหะหนัก	1 ครัวเรือน						ครัวเรือนทั้งหมด	
	ตัวคูณการปลดปล่อย ($\mu\text{g}/\text{machine}$)		อัตราการปลดปล่อย ($\mu\text{g}/\text{day}$)		อัตราการปลดปล่อย ($\mu\text{g}/\text{year}$)		อัตราการปลดปล่อย (mg/year)	
	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$
As	3.21×10^{-3}	3.56×10^{-3}	0.10	0.11	5.01	5.55	0.53	0.58
Ba	1.00	0.915	30.09	27.45	1,564.47	1,427.30	164.29	149.87
Cd	3.56×10^{-3}	3.31×10^{-4}	0.03	0.01	1.63	0.52	0.17	0.05
*Cr	0.06	3.47×10^{-4}	1.66	0.01	86.32	0.54	9.06	0.05
Cu	0.10	0.26	3.08	7.92	160.00	411.65	16.80	43.22
Mn	0.14	0.13	4.13	3.80	214.86	197.59	22.56	20.75
Ni	0.02	3.22×10^{-3}	0.51	0.10	26.73	5.03	2.81	0.53
Pb	4.06	2.66	121.74	79.88	6,330.61	4,153.83	664.71	463.15
Sb	0.06	0.03	1.70	1.00	88.43	52.08	9.29	5.47
Zn	1.98	2.22	56.80	63.55	2,726.35	3,304.53	310.12	346.98
รวม	9.19	7.13	275.76	213.95	14,339.65	11,125.28	1,505.66	1,168.15

4.5 การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของคณงานที่รื้อแยกซากโทรทัศน์

จากผลการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักที่ได้รับสัมผัสทางการหายใจจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการในข้อ 4.3.1 พบว่า การสัมผัสโลหะหนักทั้ง 11 ชนิดมีปริมาณไม่มาก แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าปริมาณที่ได้รับสัมผัสนั้นเป็นอันตรายต่อสุขภาพหรือไม่ โดยปกติแล้วปริมาณการสัมผัสโลหะหนักทางการหายใจของคณงานมักทำการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในสถานประกอบการนั้นคือค่า Time weighted average (TWA) ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่คณงานสามารถสัมผัสในบรรยากาศการทำงานที่เท่ากับหรือต่ำกว่าระดับนี้แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน (เท่ากับ 1 กะปกติของคณงาน) เป็นเวลา 5 วันต่อสัปดาห์ หรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ได้ โดยจะไม่เกิดการผิดปกติขึ้น แต่ในการศึกษาครั้งนี้เก็บตัวอย่างภายใน Chamber ที่เป็นระบบปิดขนาด 0.6 ลูกบาศก์เมตร ทำให้การรับสัมผัสโลหะหนักทางการหายใจจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์สูงกว่าค่าที่คาดว่าจะได้รับจากการรื้อแยกในรูปแบบปกติ ซึ่งโดยปกติแล้วคณงานจะทำกิจกรรมดังกล่าวประมาณ 1 ครั้งต่อสัปดาห์เท่านั้น เป็นสาเหตุให้การรับสัมผัสทางการหายใจในการศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานความปลอดภัยในการสัมผัสโลหะหนักได้ จึงนำค่าความเข้มข้นจากการสัมผัสโลหะหนักทางการหายใจมาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ โดยพิจารณาตามความเป็นพิษของโลหะหนักที่องค์การวิจัยโรคมะเร็งนานาชาติได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสารไม่ก่อมะเร็ง และกลุ่มสารก่อมะเร็ง ซึ่งสมมุติการประเมินการรับสัมผัสสารตลอดช่วงระยะเวลาทำงานเฉลี่ยที่ได้รับสัมผัสสาร 30 ปีตามข้อเสนอแนะของ U.S. EPA (U.S. EPA, 2001) สำหรับการประเมินความเสี่ยงของสารก่อมะเร็ง ได้ประเมินโดยพิจารณาตลอดอายุขัย 70 ปี ตามข้อเสนอแนะของ U.S. EPA (U.S. EPA, 2001)

4.5.1 การประเมินความเสี่ยงของสารไม่ก่อมะเร็ง

ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารกลุ่มไม่ก่อมะเร็งจากการสัมผัส PM_{2.5} (ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14) พบว่าค่า 95% Confidence level ของค่า Hazard quotients (HQ) ของสารหนู แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี อยู่ในช่วง 0.08 - 0.38, 2.43×10^{-7} - 8.13×10^{-7} , 1.81×10^{-4} - 5.94×10^{-4} , 0.40 - 4.20, 0.16- 0.62, 7.03 - 19.29, 0.36 - 2.17, 0.47 - 1.48, 0.36 - 1.48 และ 0.01 - 0.04 ตามลำดับ ในขณะที่ผลจากการสัมผัส PM_{10-2.5} พบค่า 95% Confidence level ของค่า Hazard quotients (HQ) ของโลหะหนักดังกล่าว อยู่ในช่วง 0.02 - 0.16, 2.07×10^{-7} - 7.28×10^{-7} , 4.58×10^{-5} - 3.64×10^{-4} , 0.35 - 1.60, 0.17 - 0.64, 526 - 16.41, 0.30 - 1.57, 0.31 - 0.88, 0.21 - 0.78 และ 9.58×10^{-3} - 0.06 ตามลำดับ ซึ่งค่า HQ ของโลหะหนักส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าไม่เพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสโลหะหนักทางการหายใจ ยกเว้นแมงกานีสที่ผลการศึกษาความเข้มข้นใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ในข้อ 4.3.1 จะมีค่าน้อยกว่า

ตะกั่วและสังกะสีถึง 21(PM_{2.5}), 16 (PM_{2.5}), 15 (PM_{10-2.5}), และ 28 (PM_{10-2.5}) เท่า ตามลำดับ แต่จากค่าความเข้มข้นอ้างอิงของแมงกานีสที่มนุษย์รับเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจได้ต่อวันโดยไม่เกิดความผิดปกติใดๆ ต่อสุขภาพ (RfC inhalation) มีค่าต่ำถึง 5.00×10^{-5} ซึ่งต่ำกว่าตะกั่วและสังกะสีถึง 1,000 และ 10,000 เท่า ตามลำดับ ทำให้การรับสัมผัสแมงกานีสทางการหายใจจากกิจกรรมการรื้อแยกซากโทรทัศน์นั้นอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพได้ เช่น ไข้โลหะ หายใจเหนื่อย ปวดอวัยวะ และมีอาการเรื้อรังทางระบบประสาท

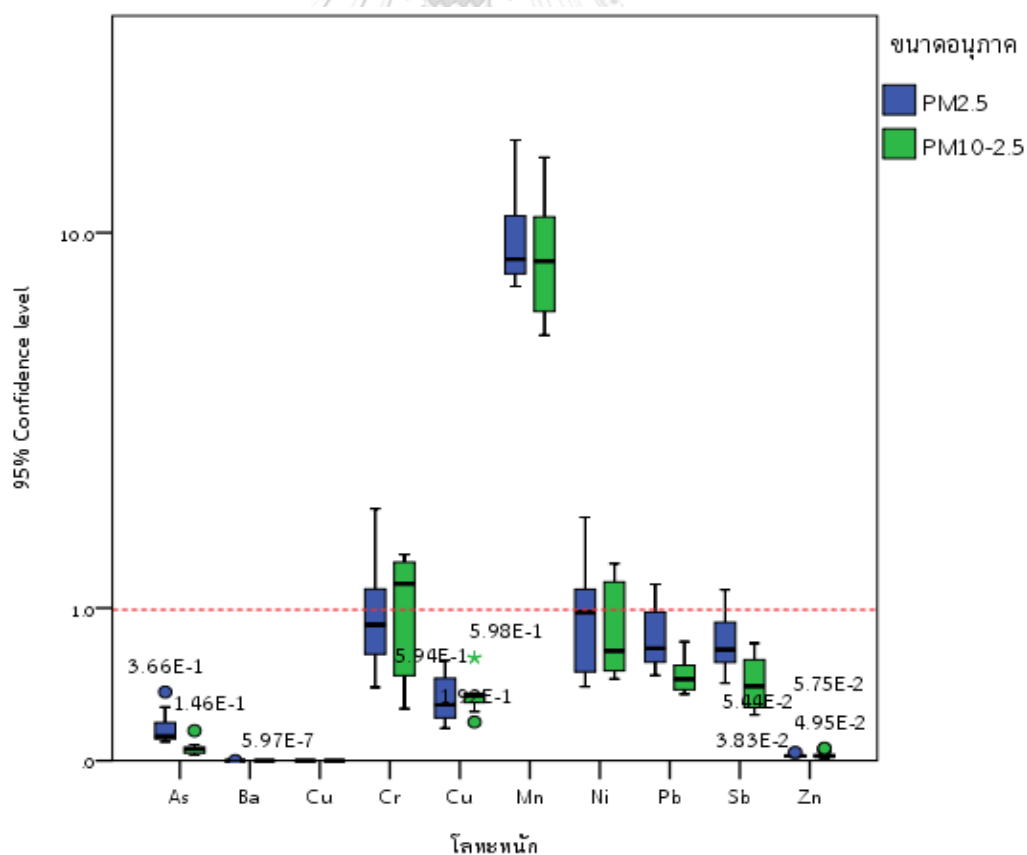
ตารางที่ 4.10 ค่า EC ค่า HQ ของสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง และค่า 95% Confidence level จากการสัมผัส PM_{2.5} และ PM_{10-2.5}

โลหะหนัก	EC (ng/m ³)		Hazard quotients (HQ) (Min-Max)		95% Confidence level ของ ค่า HQ	
	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
As	8.57 × 10 ⁻⁷ - 1.55 × 10 ⁻⁴	1.97 × 10 ⁻⁷ - 9.01 × 10 ⁻⁵	5.71 × 10 ⁻³ - 1.03	1.31 × 10 ⁻³ - 0.60	0.08 - 0.38	0.02 - 0.16
Ba	1.75 × 10 ⁻⁴ - 9.72 × 10 ⁻³	4.47 × 10 ⁻⁵ - 9.69 × 10 ⁻³	2.45 × 10 ⁻⁸ - 1.36 × 10 ⁻⁶	6.26 × 10 ⁻⁹ - 1.36 × 10 ⁻⁶	2.43 × 10 ⁻⁷ - 8.13 × 10 ⁻⁷	2.07 × 10 ⁻⁷ - 7.28 × 10 ⁻⁷
Cd	3.59 × 10 ⁻⁷ - 1.98 × 10 ⁻⁵	3.34 × 10 ⁻¹⁰ - 2.76 × 10 ⁻⁵	1.79 × 10 ⁻⁵ - 9.92 × 10 ⁻⁴	1.67 × 10 ⁻⁸ - 1.38 × 10 ⁻³	1.81 × 10 ⁻⁴ - 5.94 × 10 ⁻⁴	4.58 × 10 ⁻⁵ - 3.64 × 10 ⁻⁴
*Cr	8.81 × 10 ⁻⁷ - 1.87 × 10 ⁻³	8.55 × 10 ⁻⁷ - 2.78 × 10 ⁻⁴	8.81 × 10 ⁻³ - 18.74	8.55 × 10 ⁻³ - 2.78	0.40 - 2.58	0.35 - 1.60
Cu	1.46 × 10 ⁻⁵ - 3.04 × 10 ⁻³	146 × 10 ⁻⁵ - 2.74 × 10 ⁻³	7.30 × 10 ⁻³ - 1.52	7.32 × 10 ⁻³ - 1.37	0.16 - 0.62	0.17 - 0.64
Mn	7.46 × 10 ⁻⁵ - 1.28 × 10 ⁻³	1.34 × 10 ⁻⁵ - 1.18 × 10 ⁻³	1.49 - 25.54	0.27 - 23.67	7.03 - 19.29	5.26 - 16.41
Ni	7.71 × 10 ⁻⁶ - 1.01 × 10 ⁻³	7.88 × 10 ⁻⁶ - 5.93 × 10 ⁻⁴	0.05 - 6.74	0.05 - 3.95	0.36 - 2.17	0.30 - 1.57
Pb	1.25 × 10 ⁻³ - 3.88 × 10 ⁻²	3.76 × 10 ⁻⁴ - 2.15 × 10 ⁻²	0.08 - 2.59	0.03 - 1.43	0.47 - 1.39	0.31 - 0.88
Sb	4.48 × 10 ⁻⁶ - 6.03 × 10 ⁻⁴	5.84 × 10 ⁻⁷ - 3.65 × 10 ⁻⁴	0.02 - 3.02	2.92 × 10 ⁻³ - 1.82	0.36 - 1.48	0.21 - 0.78
Zn	5.16 × 10 ⁻⁴ - 1.97 × 10 ⁻²	3.55 × 10 ⁻⁴ - 0.07	1.72 × 10 ⁻³ - 0.07	1.18 × 10 ⁻³ - 0.24	0.01 - 0.04	9.58 × 10 ⁻³ - 0.06

เมื่อคำนวณค่าความเสี่ยงรวมของทุกชนิดโลหะที่แสดงเป็นค่า Hazard Index (HI) จากการรับสัมผัส PM_{2.5} PM_{10-2.5} และรวมการรับสัมผัสฝุ่นทั้งสองขนาด พบค่า 95% Confidence level ของค่า HI อยู่ในช่วง 10.11 – 27.09, 7.45 – 21.63 และ 18.76 – 48.34 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.11) ซึ่งมามีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าการรับสัมผัสโลหะหนักทั้ง 10 ชนิด ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นผ่านทางการหายใจมีโอกาสในการเพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพเมื่อประเมินการรับสัมผัสสารในกลุ่มสารที่ไม่ก่อมะเร็งได้ จากการรับสัมผัสตลอดช่วงระยะเวลาเฉลี่ย 30 ปีตามข้อเสนอแนะของ U.S. EPA (U.S. EPA, 2001)

ตารางที่ 4.11 ค่า Hazard index (HI) ของ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5}

ขนาดอนุภาค	Hazard index (HI) (Min-Max)		95% Confidence level ของค่า HI	
	PM _{2.5}	2.38 – 30.58	3.41 – 52.22	10.11 – 27.09
PM _{10-2.5}	0.49 – 28.55	7.45 – 21.63		



รูปที่ 4.14 95% Confidence level ของค่า HQ จากการสัมผัส PM_{2.5} และ PM_{10-2.5}

4.5.2 การประเมินความเสี่ยงของสารก่อมะเร็ง

ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารก่อมะเร็งจากการสัมผัส PM_{2.5} แสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.15 พบว่าค่า 95% Confidence level ของค่า Cancer risk ของสารหนู แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว อยู่ในช่วง $5.93 \times 10^{-5} - 2.71 \times 10^{-4}$, $1.72 \times 10^{-7} - 5.66 \times 10^{-7}$, $5.19 \times 10^{-6} - 5.47 \times 10^{-5}$, $1.58 \times 10^{-5} - 9.40 \times 10^{-5}$ และ $9.36 \times 10^{-5} - 2.79 \times 10^{-4}$ ตามลำดับ ในขณะที่ผลจากการสัมผัส PM_{10-2.5} พบค่า 95% Confidence level ของค่า Cancer risk ของโลหะหนักดังกล่าว อยู่ในช่วง $1.76 \times 10^{-5} - 1.14 \times 10^{-4}$, $4.37 \times 10^{-8} - 3.46 \times 10^{-7}$, $4.53 \times 10^{-6} - 2.09 \times 10^{-5}$, $1.29 \times 10^{-5} - 6.82 \times 10^{-5}$ และ $6.22 \times 10^{-5} - 1.76 \times 10^{-4}$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแคดเมียม โครเมียม และนิกเกิลมีค่ามากกว่า 10^{-6} แต่น้อยกว่า 10^{-4} ถือว่าอยู่ในช่วงที่ไม่เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสสาร ในขณะที่การรับสัมผัสสารหนู และตะกั่วที่พบได้ในชิ้นส่วนของแผ่นวงจรพิมพ์ และหลอดภาพรังสีคาโทด ตามลำดับ มีโอกาสเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งได้ เนื่องจากมีค่า Cancer risk เกินกว่า 1×10^{-4}

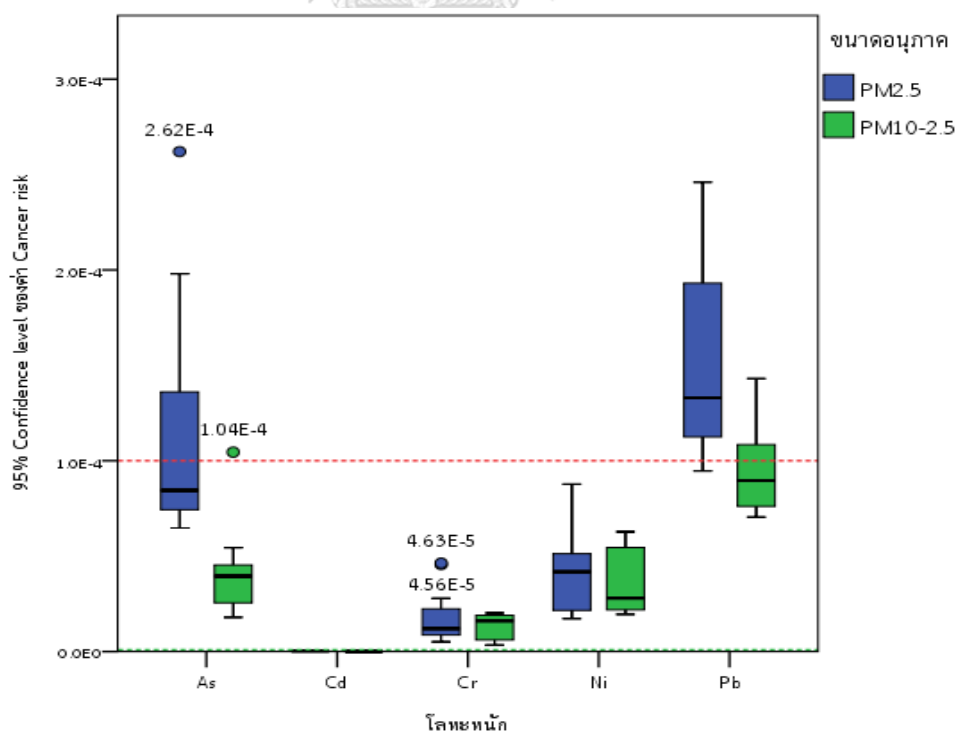
ตารางที่ 4.12 ค่า CDI ค่า Cancer risk ของสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง และค่า 95% Confidence level จากการสัมผัส PM_{2.5} และ PM_{10-2.5}

โลหะหนัก	CDI (mg/Kg BW.day)		Cancer risk		95% Confidence level ของค่า Cancer risk	
	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
As	$2.72 \times 10^{-7} - 4.92 \times 10^{-5}$	$6.25 \times 10^{-8} - 2.86 \times 10^{-5}$	$4.10 \times 10^{-6} - 7.40 \times 10^{-4}$	$9.41 \times 10^{-7} - 4.31 \times 10^{-4}$	$5.93 \times 10^{-5} - 2.71 \times 10^{-4}$	$1.76 \times 10^{-5} - 1.14 \times 10^{-4}$
Cd	$1.14 \times 10^{-7} - 6.30 \times 10^{-6}$	$1.06 \times 10^{-10} - 8.75 \times 10^{-6}$	$1.71 \times 10^{-8} - 9.45 \times 10^{-7}$	$1.59 \times 10^{-11} - 1.31 \times 10^{-6}$	$1.72 \times 10^{-7} - 5.66 \times 10^{-7}$	$4.37 \times 10^{-8} - 3.46 \times 10^{-7}$
*Cr	$2.80 \times 10^{-7} - 5.95 \times 10^{-4}$	$2.72 \times 10^{-7} - 8.83 \times 10^{-5}$	$1.15 \times 10^{-7} - 2.44 \times 10^{-4}$	$1.11 \times 10^{-7} - 3.62 \times 10^{-5}$	$5.19 \times 10^{-6} - 5.46 \times 10^{-5}$	$4.53 \times 10^{-6} - 2.09 \times 10^{-5}$
Ni	$2.45 \times 10^{-6} - 3.21 \times 10^{-4}$	$2.50 \times 10^{-6} - 1.88 \times 10^{-4}$	$2.23 \times 10^{-6} - 2.92 \times 10^{-4}$	$2.28 \times 10^{-6} - 1.71 \times 10^{-4}$	$1.58 \times 10^{-5} - 9.40 \times 10^{-5}$	$1.29 \times 10^{-5} - 6.82 \times 10^{-5}$
Pb	$3.96 \times 10^{-4} - 1.23 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-4} - 6.83 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-5} - 5.18 \times 10^{-4}$	$5.02 \times 10^{-6} - 2.87 \times 10^{-4}$	$9.36 \times 10^{-5} - 2.79 \times 10^{-4}$	$6.22 \times 10^{-5} - 1.76 \times 10^{-4}$

จากนั้นคำนวณค่าความเสี่ยงรวมของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดด้วยค่า Total cancer risk จากการรับสัมผัส $PM_{2.5}$, $PM_{10-2.5}$ และรวมการรับสัมผัสฝุ่นทั้งสองขนาด พบว่าค่า 95% Confidence level ของค่า Total cancer risk อยู่ในช่วง $2.14 \times 10^{-4} - 6.49 \times 10^{-4}$, $1.16 \times 10^{-4} - 3.58 \times 10^{-4}$ และ $3.60 \times 10^{-4} - 9.97 \times 10^{-4}$ ตามลำดับ (ดังร่างที่ 4.11) ซึ่งเกินระดับที่ยอมรับได้ที่กำหนดให้ไม่เกิน $10^{-6} - 10^{-4}$ (U.S. EPA, 1991) จึงสรุปได้ว่าผลความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดดังกล่าวผ่านทางหายใจตลอดอายุขัยเฉลี่ย 70 ปีของคนที่ทำการรื้อแยกซากโทรศัพท์จำนวน 30 เครื่องต่อสัปดาห์ และทำงานต่อเนื่อง 30 ปี มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง

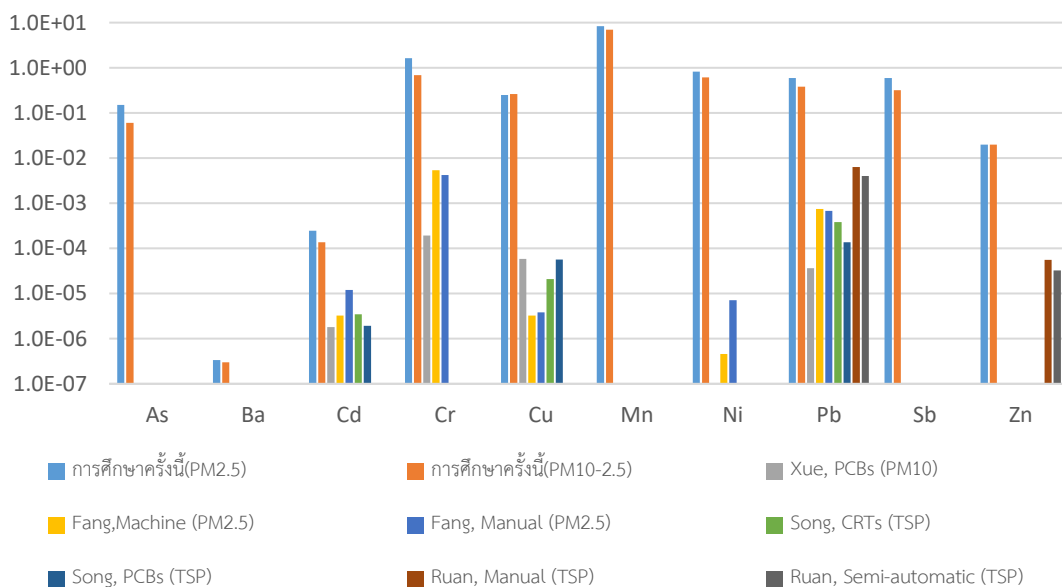
ตารางที่ 4.13 ค่า Total Cancer risk ของ $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$

ขนาดอนุภาค	Total Cancer risk		95% Confidence level ของค่า Total Cancer risk	
	$PM_{2.5}$	$1.12 \times 10^{-4} - 1.04 \times 10^{-3}$	$1.27 \times 10^{-4} - 1.33 \times 10^{-3}$	$2.14 \times 10^{-4} - 6.49 \times 10^{-4}$
$PM_{10-2.5}$	$8.42 \times 10^{-6} - 5.83 \times 10^{-4}$		$1.16 \times 10^{-4} - 3.58 \times 10^{-4}$	



รูปที่ 4.15 95% Confidence level ของค่า Cancer risk จากการสัมผัส $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$

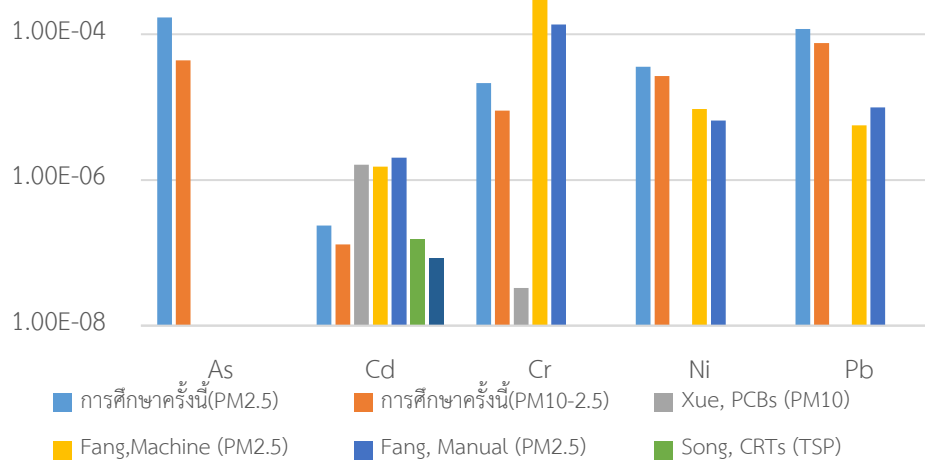
จากการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของพนักงานที่รื้อแยกซากโทรศัพท์จากรหัสสัมผัสโลหะทางการหายใจ พบว่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสสารไม่ก่อมะเร็ง (HQ) และสารก่อมะเร็ง (Cancer risk) ส่วนใหญ่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อนำค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพของการศึกษาครั้งนี้มาเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่นที่ทำการรื้อแยกโทรศัพท์แต่เน้นกระบวนการแยกบางชิ้นส่วน เช่น แผ่นวงจรพิมพ์ และหลอดภาพรังสีคาโทด พบว่าการสัมผัสสารไม่ก่อมะเร็งในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ (HQ) น้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ แต่มากกว่าการศึกษาที่ผ่านมาที่นำมาเปรียบเทียบ(ดังตารางที่ 4.14 และ รูปที่ 4.16) ในขณะที่การสัมผัสสารก่อมะเร็งในการศึกษาครั้งนี้ มีค่า Cancer risk ของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ แต่ค่า Cancer risk ของนิกเกิล และตะกั่วมากกว่าการศึกษาที่ผ่านมา ส่วนที่ค่า Cancer risk ของแคดเมียมและโครเมียมน้อยกว่าการศึกษาที่ผ่านมาที่นำมาเปรียบเทียบ(ดังตารางที่ 4.15 และ รูปที่ 4.17) เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้มีการเก็บตัวอย่างอนุภาคภายใน Chamber ที่เป็นสิ่งแวดล้อมแบบปิดและไม่มีระบบหมุนเวียนอากาศที่ดี ในขณะที่การศึกษาที่นำมาเปรียบเทียบมีการเก็บตัวอย่างอนุภาคในบรรยากาศทั่วไปภายในโรงงานที่มักมีระบบควบคุมคุณภาพอากาศ รวมถึงแต่ละการศึกษามีขั้นตอนการรื้อแยกที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ย HQ ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ย HQ ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา

กิจกรรม	โลหะหนัก	ค่าเฉลี่ย HQ				ที่มา
		PM _{2.5}	PM _{10.25}	PM ₁₀	TSP	
การรื้อแยกซากโทรทัศน์	As	0.15	0.06	-	-	การศึกษาครั้งนี้
	Ba	3.37×10^{-7}	3.01×10^{-7}	-	-	
	Cd	2.47×10^4	1.36×10^4	-	-	
	*Cr	1.64	0.69	-	-	
	Cu	0.25	0.26	-	-	
	Mn	8.34	6.94	-	-	
	Ni	0.82	0.61	-	-	
	Pb	0.59	0.38	-	-	
	Sb	0.59	0.32	-	-	
การรีไซเคิลแผ่นวงจรพิมพ์	Cr	-	-	1.92×10^4	-	Xue et al. (2012)
	Cu	-	-	5.80×10^5	-	
	Cd	-	-	1.79×10^6	-	
	Pb	-	-	3.64×10^5	-	
บริเวณที่มีการรื้อแยกด้วยเครื่องจักร	Cr	5.36×10^3	-	-	-	Fang et al. (2013)
	Ni	4.60×10^6	-	-	-	
	Cu	1.19×10^5	-	-	-	
	Cd	3.22×10^6	-	-	-	
	Pb	7.42×10^4	-	-	-	
บริเวณที่มีการรื้อแยกด้วยมือ	Cr	4.24×10^3	-	-	-	Fang et al. (2013)
	Ni	7.11×10^6	-	-	-	
	Cu	3.82×10^6	-	-	-	
	Cd	1.19×10^5	-	-	-	
	Pb	6.79×10^4	-	-	-	
การคัดแยกหลอดภาพรังสีคาโทด	Pb	-	-	-	3.82×10^4	Song et al. (2015)
	Cu	-	-	-	2.08×10^5	
	Cd	-	-	-	3.44×10^6	
การคัดแยกแผ่นวงจรพิมพ์	Pb	-	-	-	1.37×10^4	Song et al. (2015)
	Cu	-	-	-	5.67×10^5	
	Cd	-	-	-	1.91×10^6	
การรื้อแยก TV ด้วยมือ	Zn	-	-	-	5.58×10^5	Ruan et al. (2016)
	Pb	-	-	-	6.34×10^3	
การรื้อแยก TV แบบกึ่งอัตโนมัติ	Zn	-	-	-	3.26×10^5	
	Pb	-	-	-	4.01×10^3	



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่า Lifetime cancer risk กับการศึกษาอื่น

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบค่า Lifetime cancer risk กับการศึกษาอื่น

กิจกรรม	โลหะหนัก	ค่าเฉลี่ย Lifetime cancer risk				ที่มา
		PM _{2.5}	PM _{10/2.5}	PM ₁₀	TSP	
การรื้อแยกซากโทรทัศน์	As	1.07×10^{-4}	4.36×10^{-5}	-	-	การศึกษาครั้งนี้
	Cd	2.36×10^{-7}	1.30×10^{-7}	-	-	
	*Cr	2.14×10^{-5}	8.96×10^{-6}	-	-	
	Ni	3.58×10^{-5}	2.66×10^{-5}	-	-	
	Pb	1.18×10^{-4}	7.60×10^{-5}	-	-	
การรีไซเคิลแผ่นวงจรพิมพ์	Cr	-	-	3.29×10^{-8}	-	Xue et al. (2012)
	Cd	-	-	1.61×10^{-6}	-	
บริเวณที่มีการรื้อแยกด้วยเครื่องจักร	Cr	3.45×10^{-4}	-	-	-	Fang et al. (2013)
	Ni	9.43×10^{-6}	-	-	-	
	Cd	1.52×10^{-6}	-	-	-	
	Pb	5.61×10^{-6}	-	-	-	
บริเวณที่มีการรื้อแยกด้วยมือ	Cr	3.45×10^{-4}	-	-	-	Fang et al. (2013)
	Ni	9.43×10^{-6}	-	-	-	
	Cd	1.52×10^{-6}	-	-	-	
	Pb	5.61×10^{-6}	-	-	-	
การคัดแยกหลอดภาพรังสีคาโทด	Cd	-	-	-	1.52×10^{-7}	Song et al. (2015)
การคัดแยกแผ่นส่งจรรยาพิมพ์	Cd	-	-	-	8.44×10^{-8}	

จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่าผลการประเมินความเสี่ยงรวมของโลหะหนักกลุ่มไม่ก่อมะเร็ง และสารก่อมะเร็งมีค่าเกินที่ยอมรับได้ (ดังตารางที่ 4.10 และ 4.12) จึงได้นำผลการประเมินความเสี่ยงรวมจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักผ่านทางหายใจของคอนกรีตที่รื้อแยกซากโทรทัศน์ ที่ประเมินจากค่าความเข้มข้นที่ได้จากการเก็บตัวอย่างภายใน Chamber และกำหนดให้ระยะเวลาการทำงานวันละ 8 ชั่วโมง รื้อแยกซากโทรทัศน์ 30 เครื่อง/สัปดาห์ มาเปรียบเทียบกับผลการประเมินความเสี่ยงสุขภาพในพื้นที่ที่มีกิจกรรมการรื้อแยกซากขยะอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ (Background) ที่ไม่ใช่การรื้อแยกซากโทรทัศน์ในระบบปิด พบว่าค่า HI ของ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์มีค่า 29.0 และ 27.1 เท่าของความเสี่ยงที่เกิดจากการทำงานในสภาวะพื้นฐาน (Background) ตามลำดับ สำหรับของค่า Total Cancer risk ของ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} พบว่าการรื้อแยกซากโทรทัศน์ในระบบปิดมีค่า 40.9 และ 7.3 เท่าของความเสี่ยงที่เกิดจากการทำงานในสภาวะพื้นฐาน (Background) ตามลำดับ

เมื่อนำผลจากการศึกษาครั้งนี้เปรียบเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างจากผู้รื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ในพื้นที่ศึกษาเดียวกัน (ดังตารางที่ 4.16) พบว่าค่า HI ของ PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} มีค่า 29.6 และ 725.2 เท่าของการศึกษาก่อนหน้า ในขณะที่ค่า Total Cancer risk มีค่า 2.83 และ 20,308.37 เท่าของการศึกษาก่อนหน้า ซึ่งให้เห็นว่าการรื้อแยกซากโทรทัศน์ในสภาวะที่ไม่ได้วางระบบการระบายอากาศที่ดีและเพียงพอ สามารถเพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพในการเกิดโรคที่ไม่ก่อมะเร็ง และโรคมะเร็งได้ ดังนั้นผู้รื้อแยกควรได้รับคำแนะนำเกี่ยวกับการสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่เหมาะสม สร้างระบบหรือพื้นที่ในการรื้อแยกซากโทรทัศน์ที่ป้องกันการสัมผัสผ่านทางหายใจโดยตรง เช่น มีตู้ครอบระหว่างการรื้อแยกให้เป็นระบบปิด พร้อมออกแบบการรวบรวมอากาศที่ปนเปื้อนให้ผ่านระบบบำบัดที่เหมาะสม อันจะเป็นแนวทางในการลดความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสสาร รวมถึงลดโอกาสในการปลดปล่อยมลสารสู่สิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบค่า HQ และ ค่า Total cancer risk จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์กับผล การศึกษาก่อนหน้า และค่า Background

ตัวอย่าง		HI		Total Cancer risk	
PM _{2.5}	การรื้อแยกซากโทรทัศน์	12.76	29.0	2.97×10^{-4}	40.9
	Background	0.44		7.27×10^{-6}	
PM _{10-2.5}	การรื้อแยกซากโทรทัศน์	10.01	27.1	1.64×10^{-4}	7.3
	Background	0.37		2.25×10^{-5}	
PM ₁₀	การศึกษานี้	22.77	-	4.61×10^{-4}	-
	Puangprasert and Prueksasit (2019)	0.77	29.57	1.63×10^{-4}	2.83
	คณานต์ และณิธารีย์ (2559)	3.14×10^{-2}	725.16	2.27×10^{-8}	20,308.37

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากศึกษาปริมาณโลหะหนักทั้ง 11 ชนิด ได้แก่ สารหนู แบเรียม เบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสีที่ดูดซับไว้บนอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร ($PM_{2.5}$) และระหว่าง 2.5 – 10 ไมโครเมตร ($PM_{10-2.5}$) จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบ หลอดรังสีภาพคาโทด แบบตลอดกระบวนการ และแบบแยกชิ้นตอน แล้วนำไปคำนวณอัตราการปลดปล่อยโลหะหนักต่อผลิตภัณฑ์ และประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสทางการหายใจ ในพื้นที่ตำบลแดงใหญ่ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลความเข้มข้นของโลหะหนักจากการรื้อแยกแบบตลอดกระบวนการ พบว่าแบเรียม ตะกั่ว และสังกะสีเป็นโลหะหนักที่มีปริมาณสูงที่สุดใน $PM_{2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ มีค่าระหว่าง Ba = 0.303 – 6.051, Pb = 2.161 – 24.486 และ 5.148 – 65.583 mg/g ตามลำดับ Zn = 3.718 – 23.963 และ 0.958 – 20.219 mg/g ตามลำดับ ส่วนปริมาณใน $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ มีค่าระหว่าง Ba = 0.378 – 14.501, Pb = 1.991 – 74.789 และ 1.735 – 49.977 mg/g ตามลำดับ Zn = 1.225 – 570.733 และ 3.582 – 32.241 mg/g ตามลำดับ เนื่องจากตะกั่วและสังกะสีเป็นโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบในกรวยแก้ว ซึ่งมีน้ำหนักมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆที่เป็นองค์ประกอบของโทรทัศน์ ในขณะที่ผลความเข้มข้นของแบเรียมมีค่า Non-detectable (ND) มีค่าน้อยที่สุดจากโลหะหนักทั้ง 11 ชนิด และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักจากโทรทัศน์ที่มีขนาดต่างกัน พบว่าใน $PM_{2.5}$ ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดใหญ่มากกว่าขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญ ตรงข้ามกับใน $PM_{10-2.5}$ ที่ขนาดของซากโทรทัศน์ไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของความเข้มข้นของโลหะหนัก

2) ผลความเข้มข้นของโลหะหนักจากการรื้อแยกแบบแยกชิ้นตอน พบว่าทั้งชิ้นตอนการแยกชิ้นส่วน และการทุบจอนั้นมีความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีสูงที่สุดใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ทั้ง 2 ขนาด ในขณะที่ผลความเข้มข้นของแบเรียมมีค่าน้อยที่สุด เช่นเดียวกับการรื้อแยกแบบตลอดกระบวนการ และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักจากโทรทัศน์ที่มีขนาดต่างกัน พบว่าขนาดของโทรทัศน์ไม่ได้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโลหะหนักส่วนใหญ่ออย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากส่วนประกอบบางชิ้นภายในโทรทัศน์ไม่ได้มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามขนาดของโทรทัศน์

3) ค่ามัธยฐานตัวคุณการปลดปล่อยตะกั่ว และสังกะสีใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ทั้ง 2 ขนาด มีค่า Ba = 0.621, 0.422, 1.003 และ 0.915 Pb = 2.733, 1.716, 4.058 และ 2.588 $\mu\text{g}/\text{machine}$ ตามลำดับ Zn = 2.228, 1.609, 1.983 และ 2.267 $\mu\text{g}/\text{machine}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าโลหะหนักอื่นๆ เมื่อนำค่าตัวคุณการปลดปล่อยมลพิษมาคำนวณอัตราการปลดปล่อยโลหะหนักทั้ง 10 ชนิด จากผู้ประกอบการรื้อแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ในพื้นที่ศึกษาจำนวน 105 ครัวเรือน ซึ่งแต่ละครัวเรือนรื้อแยกซากโทรทัศน์ด้วยอัตรา 30 เครื่อง/สัปดาห์ พบว่าอัตราการปลดปล่อยโลหะหนักรวมใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ในพื้นที่ที่มีค่าสูงถึง 1,499.60 และ 1,166.46 mg/year ตามลำดับ ซึ่งการปลดปล่อยโลหะหนักเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ รวมถึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4) ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารไม่ก่อมะเร็ง ได้แก่ สารหนู แบริียม แคดเมียม โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว พลวง และสังกะสี พบว่าค่า 95% Confidence level ของ HQ ใน $PM_{2.5}$ อยู่ในช่วง 0.08 - 0.35, 2.24×10^{-7} - 7.50×10^{-7} , 1.67×10^{-4} - 5.48×10^{-4} , 0.40 - 2.58, 0.15 - 0.57, 6.49 - 17.80, 0.34 - 2.00, 0.43 - 1.29, 0.33 - 1.37 และ 0.01 - 0.04 ตามลำดับ ขณะที่ใน $PM_{10-2.5}$ อยู่ในช่วง 0.02 - 0.15, 1.91×10^{-7} - 6.72×10^{-7} , 4.23×10^{-5} - 3.36×10^{-4} , 0.35 - 1.60, 0.15 - 0.59, 4.86 - 15.15, 0.28 - 1.45, 0.29 - 0.81, 0.20 - 0.72 และ 8.84×10^{-3} - 0.06 ตามลำดับ ซึ่งค่า HQ ของโลหะหนักส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าไม่เพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการสัมผัสโลหะหนักทางการหายใจ ยกเว้นแมงกานีสที่มีค่า HQ เกิน 1 ทั้งใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ส่วนค่า HI มีค่ามากกว่า 1 ทั้งใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ แสดงว่าการสัมผัสโลหะหนักทั้ง 10 ชนิด ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นผ่านทางการหายใจมีโอกาสในการเพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพเมื่อประเมินการสัมผัสสารในกลุ่มสารที่ไม่ก่อมะเร็งได้

5) ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารก่อมะเร็ง ได้แก่ สารหนู แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว พบว่าค่า 95% Confidence level ของ Cancer risk ใน $PM_{2.5}$ อยู่ในช่วง 5.47×10^{-5} - 2.51×10^{-4} , 1.59×10^{-7} - 5.22×10^{-7} , 5.19×10^{-6} - 5.47×10^{-5} , 1.46×10^{-5} - 8.68×10^{-5} และ 8.64×10^{-5} - 2.57×10^{-4} ตามลำดับ ขณะที่ใน $PM_{10-2.5}$ อยู่ในช่วง 1.62×10^{-5} - 1.06×10^{-4} , 4.03×10^{-8} - 3.20×10^{-7} , 4.53×10^{-6} - 2.09×10^{-5} , 1.19×10^{-5} - 6.29×10^{-5} และ 5.74×10^{-5} - 1.63×10^{-4} ตามลำดับ ซึ่งค่า Cancer risk ของแคดเมียม โครเมียม และนิกเกิลมีค่าน้อยกว่า 10^{-4} ถือว่าอยู่ในช่วงที่ไม่เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการได้รับสัมผัสสาร ส่วนค่า Total cancer risk มีค่ามากกว่า 10^{-4} ทั้งใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ แสดงถึงการได้รับสัมผัสโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดดังกล่าวผ่านทางการหายใจมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง

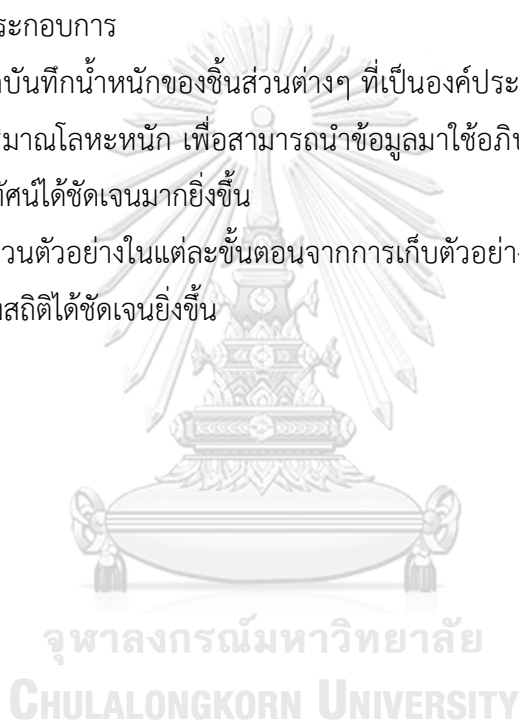
5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการเผยแพร่ผลการศึกษาให้กับผู้ประกอบการรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ในพื้นที่ และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นให้เห็นถึงอันตรายต่อสุขภาพประชาชนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการรีไซเคิลซากโทรศัพท์แบบไม่ถูกสุขลักษณะ เพื่อจะใช้เป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการในการจัดการรีไซเคิลโทรศัพท์และจัดการซากเหลือทิ้งอย่างถูกวิธีต่อไป

2) ผลจากการประเมินความเสี่ยงสุขภาพชี้ให้เห็นว่าการรีไซเคิลซากโทรศัพท์สามารถเพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพในการเป็นทั้งโรคที่ไม่ก่อมะเร็งและโรคมะเร็งได้ ดังนั้นควรมีการสื่อสารความเสี่ยงเพื่อนำไปสู่การกำหนดมาตรการในควบคุมความเสี่ยง และแนวทางในการป้องกันการสัมผัสโลหะหนักโดยตรงให้กับผู้ประกอบการ

3) ควรมีการจัดบันทึกน้ำหนักของชิ้นส่วนต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของโทรศัพท์อย่างละเอียดและนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก เพื่อสามารถนำข้อมูลมาใช้อภิปรายความแตกต่างของปริมาณโลหะหนักในซากโทรศัพท์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

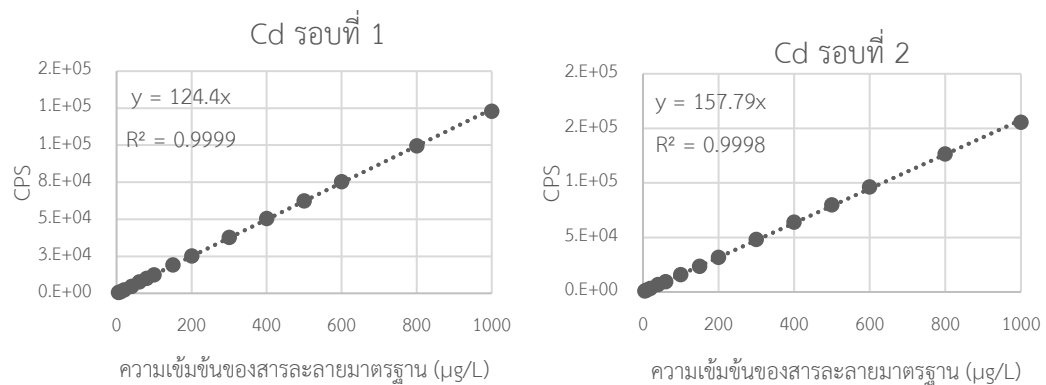
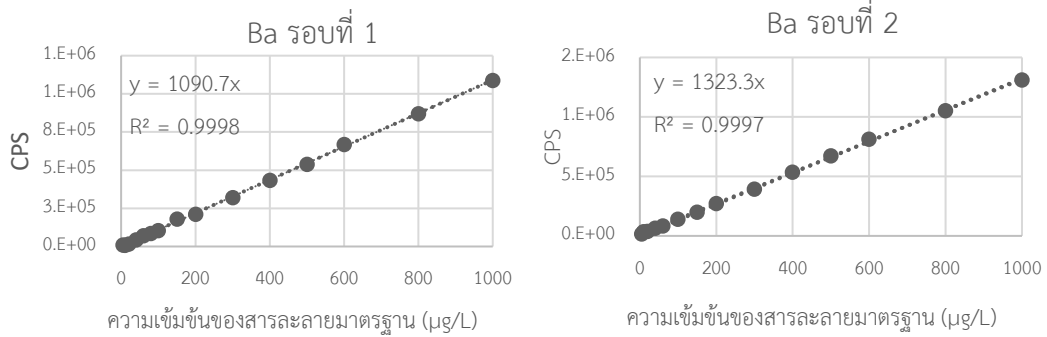
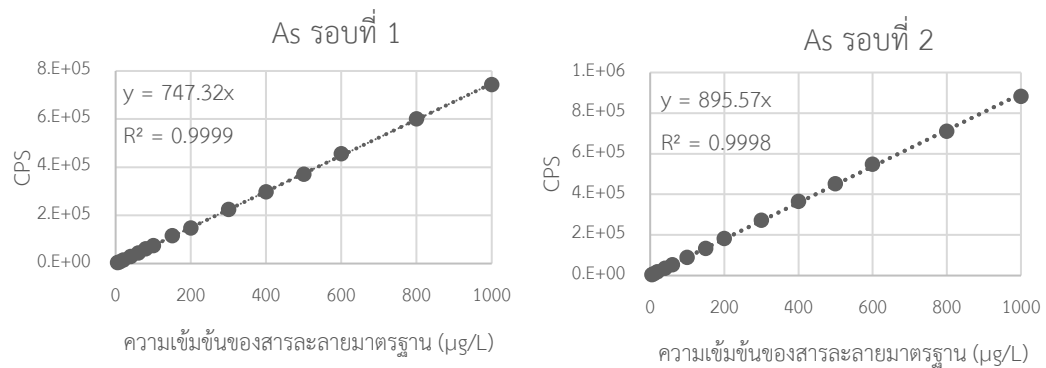
4) ควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างในแต่ละชั้นตอนจากการเก็บตัวอย่างแบบแยกชั้นตอน เพื่อสามารถเปรียบเทียบข้อมูลทางสถิติได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

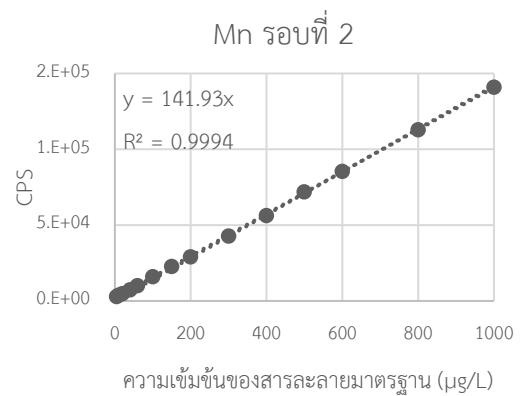
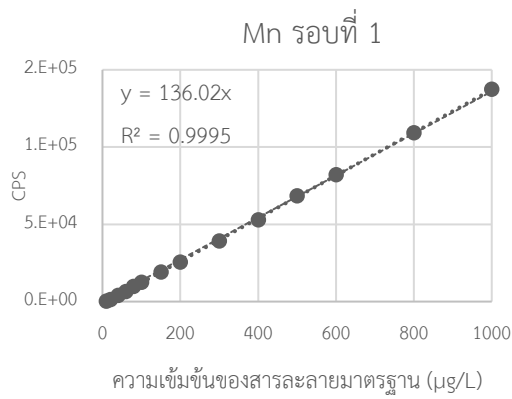
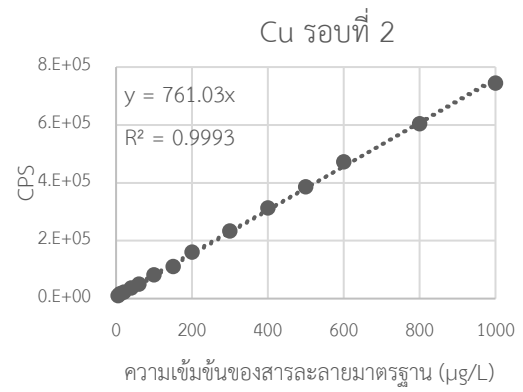
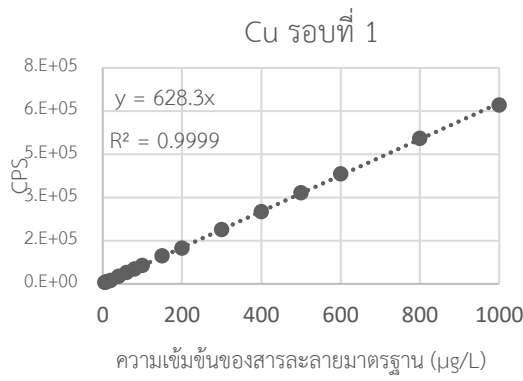
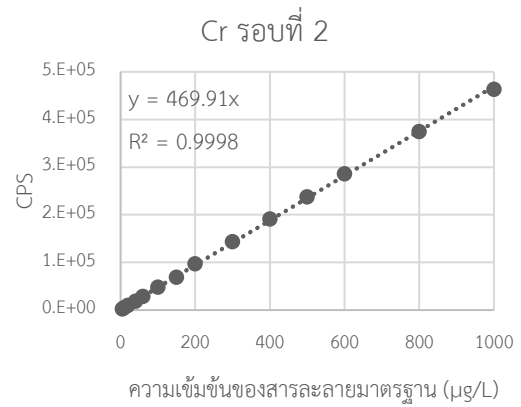
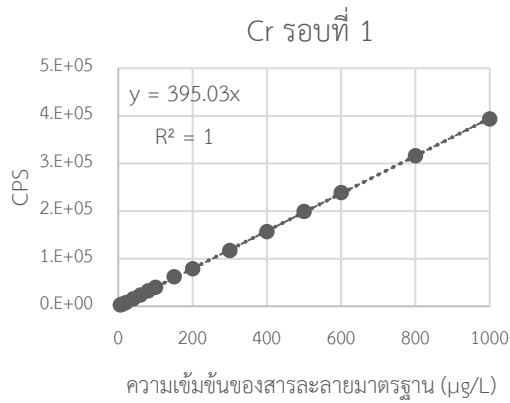


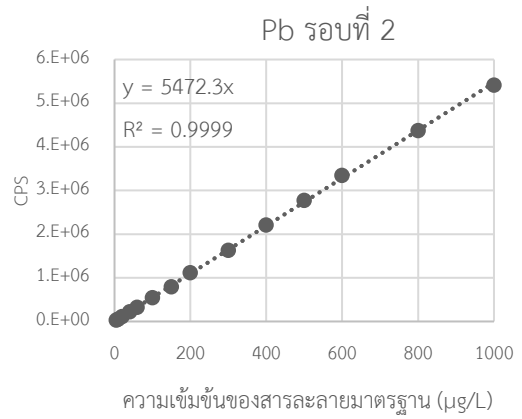
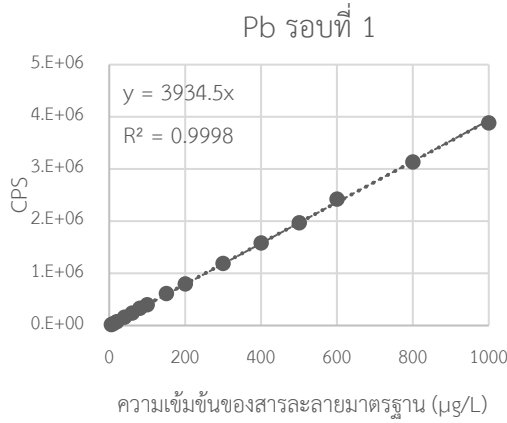
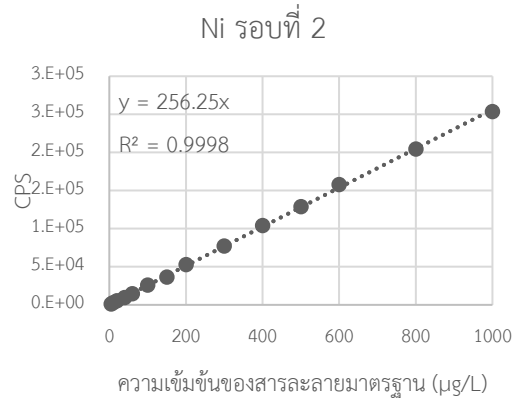
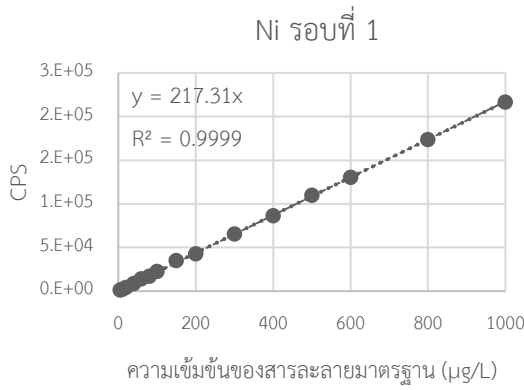
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก Calibration curves และค่า R^2

การสร้าง Calibration curve เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 4

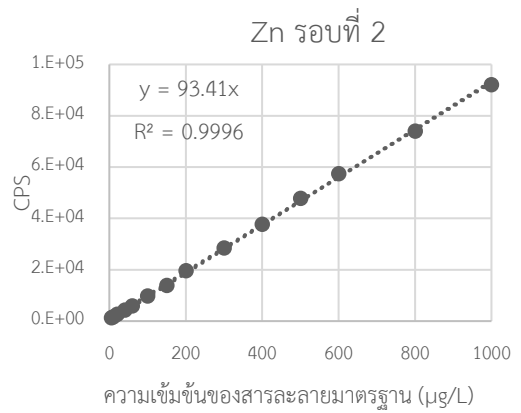
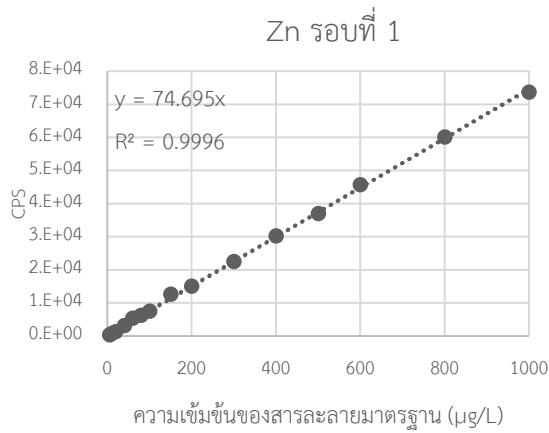


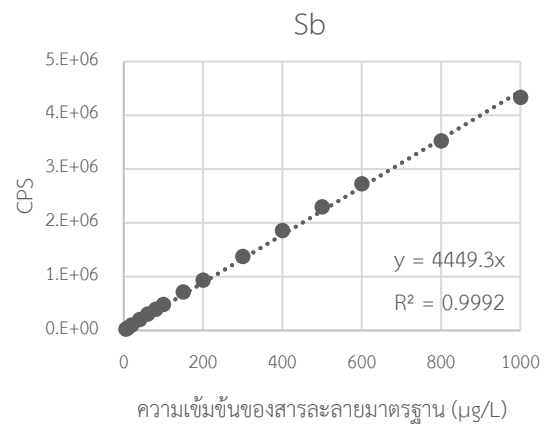




จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UNIVERSITY





ภาคผนวก ข ปริมาณอนุภาคที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์มือถือตลอดกระบวนการ

ปริมาณอนุภาคที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์มือถือตลอดกระบวนการภายใน Chamber ที่เก็บด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศเฉพาะบุคคล ต่อกับหัวคัดขนาดฝุ่น PMI ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ตารางที่ ข.1 ปริมาณ PM_{2.5} และPM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์มือถือตลอดกระบวนการ

No.	ขนาด	อัตราการไหล (L/min)	เวลา (min)	น้ำหนัก PM _{2.5} (mg)	น้ำหนัก PM _{10-2.5} (mg)	ปริมาณ PM _{2.5} (µg/m ³)	ปริมาณPM _{10-2.5} (µg/m ³)
1	21"	9.850	60	0.097	0.184	163.6	312.2
2	21"	9.642	60	0.240	0.925	415.2	1599.6
3	21"	9.613	60	0.216	0.177	374.1	306.8
4	21"	9.383	60	0.202	0.243	358.1	431.2
5	21"	9.503	60	0.155	0.127	296.5	243.2
6	21"	9.623	60	0.179	0.296	310.8	511.8
7	21"	9.607	60	0.163	0.110	282.7	190.0
8	21"	9.562	60	0.217	0.118	378.0	206.2
9	21"	9.427	60	0.346	0.206	612.5	364.0
10	21"	9.227	60	0.025	0.067	45.4	121.4
11	21"	9.230	60	0.340	0.209	614.6	376.9
12	21"	9.457	60	0.389	0.184	685.4	325.1
13	21"	9.277	60	0.155	0.092	278.5	165.8
14	21"	9.368	60	0.224	0.064	397.8	114.2
15	21"	9.398	60	0.401	0.236	711.8	418.7
16	14"	9.358	60	0.154	0.063	273.7	112.3
17	14"	9.490	60	0.143	0.051	251.0	89.8
18	14"	9.340	60	0.066	0.030	117.2	53.5
19	14"	9.478	60	0.234	0.134	410.8	236.2
20	14"	9.538	60	0.265	0.116	463.7	203.1
21	14"	9.355	60	0.347	0.188	618.9	335.0
22	14"	9.300	60	0.272	0.109	488.0	196.1
23	14"	9.240	60	0.225	0.074	405.3	134.0
24	14"	9.470	60	0.175	0.071	308.6	124.6
25	14"	9.617	60	0.199	0.116	344.7	201.6
26	14"	9.530	60	0.388	0.177	678.2	309.5
27	14"	9.515	60	0.144	0.047	252.4	82.9
28	14"	9.150	60	0.229	0.080	416.8	145.9
29	14"	9.230	60	0.190	0.072	342.6	130.6
30	14"	9.250	60	0.347	0.156	624.6	281.9

ตารางที่ ข.2 ปริมาณ PM₁₀ และ PM_{2.5/10} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ

No.	ปริมาณ PM ₁₀ (µg/m ³)	ปริมาณ PM _{2.5/10} (µg/m ³)	No.	ปริมาณ PM ₁₀ (µg/m ³)	ปริมาณ PM _{2.5/10} (µg/m ³)
1	475.8	0.3	16	386.0	0.7
2	2,014.8	0.2	17	340.8	0.7
3	680.9	0.5	18	170.8	0.7
4	789.3	0.5	19	647.0	0.7
5	539.7	0.5	20	666.8	0.7
6	822.7	0.4	21	953.9	0.6
7	472.8	0.6	22	684.0	0.7
8	584.2	0.6	23	539.3	0.8
9	976.5	0.6	24	433.2	0.7
10	166.8	0.3	25	546.3	0.6
11	991.5	0.6	26	987.8	0.7
12	1,010.5	0.7	27	335.3	0.8
13	444.3	0.6	28	562.7	0.7
14	512.0	0.8	29	473.2	0.7
15	1,130.5	0.6	30	906.5	0.7

ภาคผนวก ค ปริมาณอนุภาคที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบแยกชั้นตอน

ปริมาณอนุภาคที่เกิดจากการรื้อแยกชิ้นส่วน และทึบจอบซากโทรทัศน์เฉลี่ยต่อ 1 เครื่อง ภายใน Chamber ที่เก็บด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศเฉพาะบุคคล ต่อกับหัวคัตขนาดฝุ่น PMI ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 4

ตารางที่ ค.1 ปริมาณอนุภาค PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการแยกชิ้นส่วนซากโทรทัศน์

No.	อัตราการไหล (L/min)	เวลา (min)	น้ำหนัก PM _{2.5} (mg)	น้ำหนัก PM _{10-2.5} (mg)	ปริมาณ PM _{2.5} (µg/m ³)	ปริมาณ PM _{10-2.5} (µg/m ³)
1	9.850	60	0.7020	0.7896	395.9	445.4
2	9.642	60	0.5282	0.4442	304.3	255.9
3	9.613	60	0.4934	0.8439	285.12	487.7
4	9.383	60	0.7829	1.0631	463.6	629.5
5	9.503	60	0.5435	0.5931	317.8	346.7
6	9.623	60	0.7140	0.5421	412.2	313.0
7	9.607	60	0.5025	0.2092	290.6	121.0
8	9.562	60	0.4768	0.3472	277.0	201.8
9	9.427	60	0.6418	0.7634	378.2	449.9
10	9.227	60	0.7415	0.7410	446.5	446.2

ตารางที่ ค.2 ปริมาณอนุภาค PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} จากการทึบจอบซากโทรทัศน์

No.	อัตราการไหล (L/min)	เวลา (min)	น้ำหนัก PM _{2.5} (mg)	น้ำหนัก PM _{10-2.5} (mg)	ปริมาณ PM _{2.5} (µg/m ³)	ปริมาณ PM _{10-2.5} (µg/m ³)
1	9.277	60	0.5256	0.2304	944.3	413.9
2	9.368	60	0.3155	0.1129	561.3	200.9
3	9.398	60	1.7241	1.4864	3057.8	2636.1
4	9.358	60	0.1838	0.1225	327.3	218.12
5	9.490	60	0.3475	0.1022	610.4	179.4
6	9.340	60	0.6500	0.1652	1159.9	294.8
7	9.478	60	0.8053	0.3360	1416.2	590.8
8	9.538	60	0.6922	0.1667	1209.6	291.4
9	9.355	60	0.4462	0.2425	794.9	432.0
10	9.300	60	0.7332	0.2526	1313.9	452.8

ตารางที่ ค.3 ปริมาณอนุภาค PM₁₀ และ PM_{2.5/10} จากการแยกชิ้นส่วน และทุบจอบจากโทรศัพท์

No.	แยกชิ้นส่วน		ทุบจอบ	
	ปริมาณ PM ₁₀ (µg/m ³)	ปริมาณPM _{2.5/10} (µg/m ³)	ปริมาณ PM _{2.5} (µg/m ³)	ปริมาณPM _{10-2.5} (µg/m ³)
1	280.4	0.5	452.7	07
2	186.8	0.5	254.1	0.7
3	257.6	0.4	1,898.0	0.5
4	364.4	0.4	181.8	0.6
5	221.5	0.5	263.3	0.8
6	241.7	0.6	484.9	0.8
7	137.2	0.7	669.0	0.7
8	159.6	0.6	500.3	0.8
9	276.0	0.5	409.0	0.6
10	297.6	0.5	588.9	0.7

ภาคผนวก ง ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ
 ผลความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ทั้ง
 ขนาดใหญ่และขนาดเล็กตลอดกระบวนการ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-MS

ตารางที่ ง.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ตลอดกระบวนการ

No	ขนาด	As (µg/g)	Cd (µg/g)	Ba (mg/g)	*Cr (mg/g)	Cu (mg/g)	Mn (mg/g)	Ni (mg/g)	Pb (mg/g)	Sb (mg/g)	Zn (mg/g)
1	21"	37.420	6.158	11.554	1.526	1.059	1.459	0.033	42.523	0.719	309.400
2	21"	64.596	10.537	11.517	0.592	5.137	1.331	1.709	65.583	0.082	113.626
3	21"	1.608	1.533	2.450	0.004	0.401	0.286	0.305	16.442	0.045	3.858
4	21"	19.916	1.641	17.442	0.181	0.029	0.563	0.119	29.117	0.357	9.790
5	21"	15.353	23.058	5.387	0.472	2.319	1.035	0.021	43.617	1.428	12.862
6	21"	39.912	44.798	9.626	0.420	0.968	0.917	0.057	19.689.218	0.347	20.219
7	21"	20.836	4.568	2.688	0.393	0.133	0.825	0.198	13.913	0.209	16.378
8	21"	17.600	1.525	1.580	0.397	0.027	0.473	0.015	5.148	0.109	0.958
9	21"	2.146	0.955	11.136	0.119	0.017	0.358	0.080	19.139	0.627	5.233
11	21"	4.078	5.249	3.457	0.092	1.037	0.437	0.009	12.282	0.150	8.000
12	21"	7.775	3.446	2.285	0.087	0.896	0.490	0.197	10.296	0.240	6.834
13	21"	19.028	28.817	2.826	0.204	0.663	3.219	0.040	16.934	1.168	10.499
14	21"	4.877	2.663	2.366	3.306	0.215	0.436	0.990	9.649	0.229	5.241
15	21"	103.457	8.904	5.921	0.116	1.140	0.304	0.019	17.677	0.101	19.452
16	14"	105.973	3.875	6.051	0.002	0.811	0.492	1.198	13.031	0.101	14.501
17	14"	86.358	11.458	2.537	0.024	0.574	0.692	0.849	10.858	0.077	20.412
18	14"	150.902	18.131	3.549	0.005	0.442	1.887	0.087	23.338	0.027	11.324
19	14"	44.350	4.462	5.783	0.095	1.001	1.072	0.102	16.349	0.019	11.133
20	14"	234.396	11.221	2.341	0.147	0.671	0.578	0.242	12.171	0.019	7.385
21	14"	62.216	6.000	2.427	0.055	0.320	1.121	0.059	15.942	0.020	13.021
22	14"	31.949	10.936	4.263	0.057	0.467	0.606	0.067	10.537	0.298	23.963
23	14"	27.245	23.854	0.303	0.002	0.342	0.129	0.137	2.161	0.020	3.718
24	14"	38.585	10.189	1.719	0.223	2.278	1.236	0.560	13.917	0.120	15.377
25	14"	29.283	2.246	4.147	0.094	0.413	0.776	0.032	24.486	0.142	9.509
26	14"	17.639	12.670	1.418	0.213	1.687	1.114	0.045	7.100	0.111	15.126
27	14"	37.676	15.502	0.793	0.173	0.909	0.762	0.022	8.951	0.164	8.229
28	14"	25.850	0.604	4.315	0.084	0.892	1.052	0.014	11.944	0.199	8.499
29	14"	23.437	7.624	3.324	0.145	1.165	0.893	0.017	14.016	2.588×10 ⁻⁵	4.438
30	14"	16.225	11.662	1.551	0.087	0.749	0.577	0.162	9.213	0.031	10.005

ตารางที่ ง.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{10-2.5} จากการรื้อแยกซากโทรศัพท์มือถือกระบวนการ

No.	ขนาด	As (µg/g)	Cd (µg/g)	Ba (mg/g)	*Cr (mg/g)	Cu (mg/g)	Mn (mg/g)	Ni (mg/g)	Pb (mg/g)	Sb (mg/g)	Zn (mg/g)
1	21"	49.168	12.104	21.795	0.349	3.115	1.216	1.333	48.322	0.133	68.722
2	21"	1.875	0.358	0.540	3.754×10 ⁻⁴	0.065	0.037	0.003	1.735	0.051	19.568
3	21"	5.602	1.869	1.699	0.002	0.363	0.243	0.495	12.710	0.044	6.300
4	21"	14.908	1.363	8.935	0.001	0.124	0.480	0.013	15.053	0.204	3.582
5	21"	9.556	2.603	2.081	0.003	2.054	0.317	0.117	16.359	1.052	7.322
6	21"	12.244	37.785	6.231	0.302	0.957	0.411	0.017	8.656	0.154	8.733
7	21"	30.547	12.234	8.326	1.027	1.842	2.009	0.327	21.151	0.035	31.460
8	21"	11.104	1.259	7.171	0.003	0.375	1.615	0.027	19.947	0.452	20.170
9	21"	18.297	5.062	14.995	0.002	0.553	1.396	0.857	20.724	0.155	10.528
11	21"	7.006	1.585	3.889	0.002	2.226	0.559	0.015	9.843	0.167	10.862
12	21"	24.588	1.793	3.934	0.002	3.079	1.019	0.017	15.002	0.102	10.993
13	21"	41.353	9.679	18.644	0.802	2.890	4.209	0.035	33.900	0.003	29.624
14	21"	54.462	5.156	14.305	1.246	4.411	2.057	0.050	49.977	0.026	32.241
15	21"	151.079	22.071	5.703	0.045	1.991	0.374	0.014	16.391	0.236	22.174
16	14"	30.654	11.805	8.173	0.006	0.093	0.710	1.602	22.934	0.342	25.803
17	14"	21.327	14.560	13.222	0.007	0.115	1.646	2.460	31.223	0.167	57.073
18	14"	34.700	4.966	12.192	1.572	2.084	5.566	1.379	74.798	0.319	53.042
19	14"	10.147	2.218	2.565	0.140	0.533	1.132	0.233	13.665	0.162	4.888
20	14"	90.412	0.001	0.714	0.003	0.051	0.094	0.750	2.547	0.337	1.225
21	14"	5.932	7.919	1.203	0.002	0.031	0.049	0.153	1.991	0.128	2.566
22	14"	18.803	6.805	14.502	0.454	1.018	1.465	0.030	23.218	0.452	58.473
23	14"	1.061	8.015	1.273	0.005	0.079	0.072	0.353	3.291	0.253	9.227
24	14"	30.805	31.543	6.761	1.183	8.651	6.667	0.907	52.297	0.260	83.716
25	14"	21.944	2.844	6.213	0.014	1.335	1.538	0.028	26.359	0.002	16.344
26	14"	24.085	1.869	2.925	0.332	6.217	2.146	0.018	16.309	0.004	39.141
27	14"	1.666	6.989	0.378	0.007	0.270	0.113	0.068	3.185	0.195	8.448
28	14"	26.301	4.130	8.954	0.004	2.907	2.877	0.085	26.551	0.197	36.965
30	14"	13.309	2.115	1.578	0.468	1.530	0.597	0.020	8.423	0.120	8.688

ภาคผนวก จ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์แบบแยกชิ้นตอน

ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} และ PM_{10-2.5} ที่เกิดจากการรื้อแยกซากโทรทัศน์เฉลี่ย 1 เครื่องจากกระบวนการแยกชิ้นส่วน และการทบทวน จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-MS

ตารางที่ จ.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} ที่เกิดจากกระบวนการแยกชิ้นส่วน

No	ขนาด	As (µg/g)	Ba (µg/g)	Cd (µg/g)	*Cr (µg/g)	Cu (µg/g)	Mn (µg/g)	Ni (µg/g)	Pb (µg/g)	Sb (µg/g)	Zn (µg/g)
1	21"	3.477	197.512	5.462	161.253	237.040	505.250	63.487	406.133	48.795	831.102
2	21"	2.584	11.743	44.155	139.285	227.042	508.282	1.304	879.683	3.122	27.520
3	21"	2.305	139.963	2.617	61.138	474.687	925.418	109.897	1,595.270	30.027	6,003.708
4	21"	1.990	147.006	3.648	0.645	207.178	242.975	24.373	777.902	34.871	3,270.327
5	21"	1.471	93.688	1.944	0.590	350.335	302.746	49.150	1,032.518	45.155	1,339.520
6	21"	1.024	14.012	0.303	0.449	49.282	72.087	6.415	160.040	1.678	534.296
7	21"	0.223	12.344	0.431	0.800	19.062	10.994	1.371	12.837	0.157	16.590
8	21"	0.235	13.009	0.492	0.844	20.089	1.756	52.227	1.908	0.166	17.484
9	21"	1.912	41.019	1.951	155.222	398.583	343.767	77.752	922.418	39.910	4,177.023
10	21"	16.328	57.359	1.161	163.832	325.631	533.786	73.573	353.574	25.970	2,319.326

ตารางที่ จ.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{2.5} ที่เกิดจากกระบวนการทบทวน

No	ขนาด	As (µg/g)	Cd (µg/g)	*Cr (µg/g)	Cu (µg/g)	Mn (µg/g)	Ni (µg/g)	Sb (µg/g)	Ba (mg/g)	Pb (mg/g)	Zn (mg/g)
1	21"	1.495	0.412	0.658	18.223	12.084	1.311	17.739	0.940	2.816	4.660
2	21"	0.546	0.686	1.097	152.106	32.958	2.184	20.278	4.701	4.500	1.045
3	21"	0.956	1.044	61.818	45.789	60.948	19.885	82.762	8.889	5.345	43.792
4	21"	2.326	1.278	5.076	344.439	119.547	597.430	39.498	5.755	2.402	2.478
5	21"	0.298	0.623	0.923	27.560	0.250	1.982	5.396	2.102	1.404	0.404
6	14"	1.888	0.602	0.493	21.098	38.348	23.809	68.099	2.393	8.098	35.436
7	14"	0.231	0.269	234.493	11.893	5.833	0.855	13.355	0.959	1.980	11.104
8	14"	0.408	0.170	0.581	13.837	11.374	0.995	9.542	1.817	2.081	0.947
9	14"	1.236	0.485	110.619	21.466	28.078	1.544	54.472	1.227	5.289	16.039
10	14"	0.153	0.295	0.549	13.064	1.142	0.940	0.108	0.008	0.228	0.011

ตารางที่ จ.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{10-2.5} ที่เกิดจากกระบวนการแยกชิ้นส่วน

No.	ขนาด	As (µg/g)	Cd (µg/g)	Ni (µg/g)	Sb (µg/g)	Ba (mg/g)	*Cr (mg/g)	Cu (mg/g)	Mn (mg/g)	Pb (mg/g)	Zn (mg/g)
1	21"	5.396	8.572	96.618	44.307	0.219	0.121	0.532	1.053	1.074	3.530
2	21"	3.834	26.869	127.794	16.476	0.200	0.289	0.347	0.653	1.226	3.234
3	21"	2.533	4.219	99.896	17.912	0.555	0.259	0.454	1.023	1.632	8.665
4	21"	3.697	2.172	65.642	1.659	1.785	0.140	0.275	0.381	0.964	5.140
5	21"	3.801	2.177	26.388	87.581	0.238	0.071	0.682	0.622	1.954	4.408
6	14"	4.375	1.010	1.271	10.842	0.564	0.161	0.446	0.682	1.143	3.207
7	14"	1.022	1.122	3.293	41.632	0.891	0.096	0.369	0.844	0.806	3.072
8	14"	1.847	1.465	1.984	35.440	0.093	0.131	0.382	0.795	0.677	3.024
9	14"	3.513	3.075	151.275	38.643	0.170	0.167	0.590	1.428	1.468	5.640
10	14"	5.880	2.799	53.665	2.109	0.067	0.034	0.181	0.321	0.187	1.436

ตารางที่ จ.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักใน PM_{10-2.5} ที่เกิดจากกระบวนการท่อบจ

No.	ขนาด	As (µg/g)	Cd (µg/g)	*Cr (µg/g)	Cu (µg/g)	Mn (µg/g)	Ni (µg/g)	Sb (µg/g)	Ba (mg/g)	Pb (mg/g)	Zn (mg/g)
1	21"	6.584	1.529	99.866	41.577	69.492	45.294	69.610	5.725	12.247	18.268
2	21"	1.466	3.119	391.605	84.836	60.107	11.312	41.502	14.138	9.462	5.597
3	21"	1.442	1.395	230.804	68.865	116.296	24.824	32.006	7.552	7.570	93.160
4	21"	1.857	2.875	347.392	78.187	130.687	37.574	38.352	7.571	5.617	7.737
5	21"	1.098	2.119	5.322	93.748	0.167	6.743	20.230	5.562	3.535	0.082
6	14"	0.679	1.310	58.476	57.966	7.109	4.169	16.311	1.059	4.474	12.764
7	14"	0.657	0.644	72.735	28.509	43.377	2.051	50.261	3.052	13.663	59.438
8	14"	0.673	1.298	3.261	57.445	67.054	4.132	35.751	3.483	10.716	8.132
9	14"	1.990	1.614	180.425	39.502	99.217	35.580	67.318	1.958	14.313	54.912
10	14"	0.955	1.239	98.367	37.912	34.953	101.784	0.868	1.502	3.657	5.483

ตารางที่ จ.5 ความเข้มข้นของโลหะหนักรวมใน $PM_{2.5}$ และ $PM_{10-2.5}$ ที่เกิดจากการรื้อแยกซาก
โทรทัศน์แบบแยกชั้นตอน

No.	แยกชิ้นส่วน (mg/g)				ทุบจ่อ (mg/g)			
	โทรทัศน์ขนาดเล็ก		โทรทัศน์ขนาดใหญ่		โทรทัศน์ขนาดเล็ก		โทรทัศน์ขนาดใหญ่	
	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$
1	2.460	6.684	0.840	6.222	8.467	36.574	46.081	18.444
2	1.845	6.123	0.075	6.124	10.455	29.790	14.309	76.351
3	9.345	12.713	0.108	5.143	58.274	108.758	4.882	22.500
4	4.711	8.758	6.160	9.659	11.741	21.561	22.773	71.608
5	3.217	8.095	3.871	2.290	3.947	9.308	0.264	10.918



ภาคผนวก ฉ ตัวคูณการปลดปล่อยมลพิษ

การปลดปล่อยโลหะหนักในอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM_{2.5}) และระหว่าง 2.5 – 10 ไมโครเมตร (PM_{10-2.5}) จากการรื้อแยกซากโทรทัศน์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตลอดกระบวนการ

ตารางที่ ฉ.1 ค่าตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักใน PM_{2.5}

No.	ขนาด	ค่าตัวคูณการปลดปล่อย (µg/machine)									
		As	Ba	Cd	*Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
1	21"	0.004	1.117	0.001	0.148	0.102	0.141	0.003	4.112	0.070	-
2	21"	0.016	2.766	0.003	0.142	1.234	0.320	0.410	15.753	0.020	-
3	21"	3.469×10 ⁴	0.529	3.308×10 ⁴	0.001	0.086	0.062	0.066	3.548	0.010	0.832
4	21"	0.004	3.516	3.308×10 ⁴	0.036	0.006	0.114	0.024	5.870	0.072	1.974
5	21"	0.002	0.835	0.004	0.073	0.359	0.160	0.003	6.759	0.221	1.993
6	21"	0.007	1.728	0.008	0.075	0.174	0.165	0.010	3.534	0.062	3.629
7	21"	0.003	0.438	0.001	0.064	0.022	0.134	0.032	2.267	0.034	2.669
8	21"	0.004	0.343	3.308×10 ⁴	0.086	0.006	0.103	0.003	1.116	0.024	0.208
9	21"	0.001	3.858	3.308×10 ⁴	0.041	0.006	0.124	0.028	6.631	0.217	1.813
11	21"	0.001	1.177	0.002	0.031	0.353	0.149	0.003	4.180	0.051	2.723
12	21"	0.003	0.889	0.001	0.034	0.348	0.190	0.076	4.004	0.093	2.658
13	21"	0.003	0.438	0.004	0.032	0.103	0.499	0.006	2.625	0.181	1.627
14	21"	0.001	0.529	0.001	0.739	0.048	0.098	0.221	2.158	0.051	1.172
15	21"	0.042	2.376	0.004	0.739	0.458	0.122	0.008	7.094	0.040	7.807
16	14"	0.016	0.930	0.001	0.047	0.125	0.076	0.184	2.002	0.016	2.228
17	14"	0.012	0.363	0.002	0.125	0.082	0.099	0.121	1.552	0.011	2.918
18	14"	0.010	0.233	0.001	0.082	0.029	0.124	0.006	1.533	0.002	0.744
19	14"	0.010	1.351	0.001	0.029	0.234	0.250	0.024	3.819	0.004	2.601
20	14"	0.062	0.621	0.003	0.234	0.178	0.153	0.064	3.230	0.005	1.960
21	14"	0.022	0.843	0.002	0.178	0.111	0.389	0.021	5.538	0.007	4.523
22	14"	0.009	1.161	0.003	0.111	0.127	0.165	0.018	2.869	0.081	6.525
23	14"	0.006	0.068	0.005	0.127	0.077	0.029	0.031	0.486	0.005	0.835
24	14"	0.007	0.302	0.002	0.077	0.400	0.217	0.098	2.441	0.021	2.697
25	14"	0.006	0.825	4.467×10 ⁴	0.400	0.082	0.154	0.006	4.870	0.028	1.891
26	14"	0.007	0.550	0.005	0.082	0.654	0.432	0.017	2.753	0.043	5.866
27	14"	0.005	0.114	0.002	0.654	0.131	0.110	0.003	1.289	0.024	1.186
28	14"	0.006	0.987	1.382×10 ⁴	0.131	0.204	0.241	0.003	2.733	0.046	1.945
29	14"	0.004	0.631	0.001	0.204	0.221	0.169	0.003	2.659	0.000	0.842
30	14"	0.006	0.538	0.004	0.221	0.260	0.200	0.056	3.194	0.011	3.468

ตารางที่ ฉ.2 ค่าตัวคูณการปลดปล่อยโลหะหนักใน PM_{10-2.5}

No	ขนาด	ค่าตัวคูณการปลดปล่อย ($\mu\text{g}/\text{machine}$)									
		As	Ba	Cd	*Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
1	21"	0.009	4.021	0.002	0.064	0.575	0.224	0.246	8.915	0.025	-
2	21"	0.002	0.500	3.308×10^{-4}	3.474×10^{-4}	0.060	0.034	0.003	1.606	0.047	-
3	21"	0.001	0.301	3.308×10^{-4}	3.474×10^{-4}	0.064	0.043	0.088	2.249	0.008	1.115
4	21"	0.004	2.169	3.308×10^{-4}	3.474×10^{-4}	0.030	0.117	0.003	3.654	0.050	0.870
5	21"	0.001	0.265	3.308×10^{-4}	3.474×10^{-4}	0.261	0.040	0.015	2.079	0.134	0.931
6	21"	0.004	1.842	0.011	0.089	0.283	0.121	0.005	2.558	0.045	2.581
7	21"	0.003	0.912	0.001	0.113	0.202	0.220	0.036	2.317	0.004	3.446
8	21"	0.001	0.848	1.490×10^{-4}	3.474×10^{-4}	0.044	0.191	0.003	2.360	0.053	2.386
9	21"	0.004	3.088	0.001	3.474×10^{-4}	0.114	0.288	0.176	4.267	0.032	2.168
11	21"	0.001	0.812	3.308×10^{-4}	3.474×10^{-4}	0.465	0.117	0.003	2.055	0.035	2.267
12	21"	0.005	0.726	3.308×10^{-4}	3.474×10^{-4}	0.568	0.188	0.003	2.767	0.019	2.028
13	21"	0.004	1.721	0.001	3.474×10^{-4}	0.267	0.388	0.003	3.129	0.000	2.734
14	21"	0.003	0.918	3.308×10^{-4}	0.074	0.283	0.132	0.003	3.207	0.002	2.069
15	21"	0.036	1.347	0.005	0.080	0.470	0.088	0.003	3.870	0.056	5.235
16	14"	0.002	0.515	0.001	3.474×10^{-4}	0.006	0.045	0.101	1.446	0.022	1.627
17	14"	0.001	0.676	0.001	3.474×10^{-4}	0.006	0.084	0.126	1.597	0.009	1.724
18	14"	0.001	0.366	1.490×10^{-4}	0.047	0.063	0.167	0.041	2.244	0.010	1.591
19	14"	0.001	0.345	2.980×10^{-4}	0.019	0.072	0.152	0.031	1.836	0.022	0.657
20	14"	0.011	0.083	1.340×10^{-7}	3.474×10^{-4}	0.006	0.011	0.087	0.296	0.039	0.142
21	14"	0.001	0.226	0.001	3.474×10^{-4}	0.006	0.009	0.029	0.374	0.024	0.482
22	14"	0.002	1.586	0.001	0.050	0.111	0.160	0.003	2.540	0.049	6.397
23	14"	0.000	0.095	0.001	3.474×10^{-4}	0.006	0.005	0.026	0.245	0.019	0.686
24	14"	0.002	0.479	0.002	0.084	0.612	0.472	0.064	3.703	0.018	5.927
25	14"	0.003	0.723	3.308×10^{-4}	0.002	0.155	0.179	0.003	3.066	0.000	1.901
26	14"	0.004	0.518	3.308×10^{-4}	0.059	1.100	0.380	0.003	2.887	0.001	6.928
27	14"	0.000	0.018	3.308×10^{-4}	3.474×10^{-4}	0.013	0.005	0.003	0.151	0.009	0.400
28	14"	0.002	0.717	3.308×10^{-4}	3.474×10^{-4}	0.233	0.230	0.007	2.127	0.016	2.961
30	14"	0.002	0.247	3.308×10^{-4}	0.073	0.239	0.093	0.003	1.318	0.019	1.359

ภาคผนวก ข การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของคณงานที่รื้อแยกซากโทรศัพท์

ค่าประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารกลุ่มไม่ก่อมะเร็ง และสารก่อมะเร็งจากการรับสัมผัสโลหะหนักผ่านทางหายใจของคณงานที่รื้อแยกซากโทรศัพท์

ตารางที่ ข.1 ค่าประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารกลุ่มไม่ก่อมะเร็ง (HQ) ใน PM_{2.5}

No.	As	Ba	Cd	*Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
TV1	0.054	3.481×10^{-7}	6.626×10^{-5}	3.558	0.114	6.278	0.047	0.610	0.774	-
TV2	0.235	8.804×10^{-7}	2.877×10^{-4}	3.500	1.403	14.533	6.220	2.387	0.223	-
TV3	0.005	1.688×10^{-7}	3.771×10^{-5}	0.021	0.099	2.812	0.999	0.539	0.111	0.006
TV4	0.063	1.150×10^{-6}	3.864×10^{-5}	0.922	0.007	5.306	0.373	0.914	0.840	0.015
TV5	0.040	2.941×10^{-7}	4.495×10^{-4}	1.995	0.452	8.073	0.054	1.134	2.785	0.017
TV6	0.109	5.509×10^{-7}	9.156×10^{-4}	1.858	0.198	7.499	0.157	0.537	0.709	0.028
TV7	0.052	1.399×10^{-7}	8.493×10^{-5}	1.585	0.025	6.132	0.491	0.345	0.389	0.020
TV8	0.058	1.099×10^{-7}	3.792×10^{-5}	2.140	0.007	4.700	0.049	0.171	0.270	0.002
TV9	0.012	1.256×10^{-6}	3.846×10^{-5}	1.040	0.007	5.762	0.429	1.028	2.528	0.014
TV11	0.022	3.912×10^{-7}	2.121×10^{-4}	0.805	0.419	7.071	0.051	0.662	0.605	0.022
TV12	0.047	2.883×10^{-7}	1.553×10^{-4}	0.854	0.404	8.827	1.182	0.619	1.083	0.021
TV13	0.046	1.449×10^{-7}	5.277×10^{-4}	0.809	0.121	23.574	0.098	0.413	2.138	0.013
TV14	0.017	1.733×10^{-7}	6.967×10^{-5}	18.739	0.056	4.564	3.453	0.337	0.598	0.009
TV15	0.646	7.759×10^{-7}	4.167×10^{-4}	1.176	0.534	5.693	0.119	1.103	0.470	0.061
TV16	0.254	3.049×10^{-7}	6.974×10^{-5}	0.009	0.146	3.543	2.874	0.313	0.182	0.017
TV17	0.190	1.173×10^{-7}	1.891×10^{-4}	0.085	0.095	4.569	1.868	0.239	0.127	0.022
TV18	0.155	7.661×10^{-8}	1.398×10^{-4}	0.009	0.034	5.818	0.089	0.240	0.021	0.006
TV19	0.160	4.374×10^{-7}	1.205×10^{-4}	0.556	0.270	11.580	0.368	0.589	0.050	0.020
TV20	0.953	1.999×10^{-7}	3.422×10^{-4}	0.968	0.205	7.044	0.985	0.495	0.059	0.015
TV21	0.338	2.766×10^{-7}	2.442×10^{-4}	0.486	0.130	18.244	0.322	0.865	0.080	0.035
TV22	0.137	3.830×10^{-7}	3.509×10^{-4}	0.396	0.150	7.782	0.285	0.451	0.956	0.051
TV23	0.097	2.261×10^{-8}	6.357×10^{-4}	0.009	0.091	1.378	0.488	0.077	0.054	0.007
TV24	0.104	9.770×10^{-8}	2.068×10^{-4}	0.979	0.462	10.032	1.516	0.377	0.244	0.021
TV25	0.088	2.632×10^{-7}	5.090×10^{-5}	0.461	0.094	7.035	0.096	0.740	0.323	0.014
TV26	0.105	1.771×10^{-7}	5.650×10^{-4}	2.059	0.752	19.876	0.265	0.422	0.494	0.045
TV27	0.083	3.682×10^{-8}	2.572×10^{-4}	0.622	0.151	5.058	0.049	0.198	0.272	0.009
TV28	0.094	3.311×10^{-7}	1.655×10^{-5}	0.498	0.244	11.536	0.051	0.436	0.546	0.016
TV29	0.070	2.097×10^{-7}	1.717×10^{-4}	0.706	0.263	8.049	0.051	0.421	0.170	0.007
TV30	0.089	1.784×10^{-7}	4.790×10^{-4}	0.773	0.308	9.482	0.889	0.504	0.126	0.027

ตารางที่ ๒.2 ค่าประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารกลุ่มไม่ก่อมะเร็ง (HQ) ใน PM_{10-2.5}

No.	As	Ba	Cd	*Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
TV1	0.135	1.253 × 10 ⁶	2.485 × 10 ⁻⁴	3.558	0.639	9.983	3.647	1.323	0.273	-
TV2	0.026	1.590 × 10 ⁷	3.760 × 10 ⁻⁵	3.500	0.069	1.560	0.048	0.243	0.537	-
TV3	0.015	9.597 × 10 ⁸	3.771 × 10 ⁻⁵	0.021	0.073	1.962	1.331	0.342	0.089	8.473 × 10 ⁻³
TV4	0.056	7.093 × 10 ⁷	3.864 × 10 ⁻⁵	0.922	0.035	5.447	0.050	0.569	0.579	6.771 × 10 ⁻³
TV5	0.020	9.320 × 10 ⁸	4.162 × 10 ⁻⁵	1.995	0.328	2.029	0.250	0.349	1.683	7.806 × 10 ⁻³
TV6	0.055	5.872 × 10 ⁷	1.272 × 10 ⁻³	1.858	0.322	5.528	0.074	0.388	0.518	0.020
TV7	0.051	2.913 × 10 ⁷	1.529 × 10 ⁻⁴	1.585	0.230	10.043	0.546	0.352	0.044	0.026
TV8	0.020	2.723 × 10 ⁷	1.708 × 10 ⁻⁵	2.140	0.051	8.760	0.050	0.361	0.612	0.018
TV9	0.058	1.005 × 10 ⁶	1.212 × 10 ⁻⁴	1.040	0.132	13.371	2.734	0.661	0.371	0.017
TV11	0.023	2.699 × 10 ⁷	3.928 × 10 ⁻⁵	0.805	0.552	5.537	0.051	0.325	0.414	0.018
TV12	0.070	2.355 × 10 ⁷	3.634 × 10 ⁻⁵	0.854	0.658	8.712	0.049	0.428	0.218	0.016
TV13	0.060	5.692 × 10 ⁷	1.055 × 10 ⁻⁴	0.809	0.315	18.358	0.050	0.493	2.797 × 10 ⁻³	0.022
TV14	0.055	3.007 × 10 ⁷	3.870 × 10 ⁻⁵	18.739	0.331	6.176	0.050	0.500	0.020	0.016
TV15	0.555	4.397 × 10 ⁷	6.077 × 10 ⁻⁴	1.176	0.548	4.123	0.050	0.602	0.650	0.041
TV16	0.030	1.690 × 10 ⁷	8.719 × 10 ⁻⁵	0.009	6.884 × 10 ⁻³	2.099	1.577	0.226	0.252	0.013
TV17	0.017	2.186 × 10 ⁷	8.597 × 10 ⁻⁵	0.085	6.788 × 10 ⁻⁵	3.888	1.936	0.246	0.099	0.225
TV18	0.016	1.202 × 10 ⁷	1.748 × 10 ⁻⁵	0.009	0.073	7.837	0.647	0.351	0.112	0.012
TV19	0.021	1.116 × 10 ⁷	3.445 × 10 ⁻⁵	0.556	0.083	7.036	0.482	0.283	0.251	0.005
TV20	0.161	2.672 × 10 ⁸	1.539 × 10 ⁻⁸	0.968	0.007	0.501	1.336	0.045	0.450	1.091 × 10 ⁻³
TV21	0.017	7.421 × 10 ⁸	1.744 × 10 ⁻⁴	0.486	0.007	0.428	0.449	0.058	0.282	0.004
TV22	0.032	5.234 × 10 ⁷	8.773 × 10 ⁻⁵	0.396	0.131	7.556	0.050	0.399	0.582	0.050
TV23	0.001	3.142 × 10 ⁸	7.063 × 10 ⁻⁵	0.009	0.007	0.254	0.415	0.039	0.223	0.005
TV24	0.034	1.551 × 10 ⁷	2.584 × 10 ⁻⁴	0.979	0.709	21.850	0.991	0.571	0.213	0.046
TV25	0.039	2.306 × 10 ⁷	3.770 × 10 ⁻⁵	0.461	0.177	8.158	0.049	0.466	2.698 × 10 ⁻³	0.014
TV26	0.065	1.667 × 10 ⁷	3.804 × 10 ⁻⁵	2.059	1.265	17.475	0.049	0.443	0.009	0.053
TV27	0.001	5.775 × 10 ⁹	3.810 × 10 ⁻⁵	0.622	0.015	0.247	0.049	0.023	0.106	0.003
TV28	0.034	2.405 × 10 ⁷	3.962 × 10 ⁻⁵	0.498	0.279	11.041	0.109	0.340	0.189	0.024
TV30	0.033	8.191 × 10 ⁸	3.919 × 10 ⁻⁵	0.706	0.284	4.427	0.051	0.208	0.222	0.011

ตารางที่ ข.3 ค่าประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารกลุ่มก่อมะเร็ง (Lifetime cancer risk)

No.	As		Cd		*Cr		Ni		Pb	
	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}
TV1	3.849 × 10 ⁻⁵	9.650 × 10 ⁻⁵	6.314 × 10 ⁻⁸	2.368 × 10 ⁻⁷	4.634 × 10 ⁻⁵	2.021 × 10 ⁻⁵	2.058 × 10 ⁻⁶	1.581 × 10 ⁻⁴	1.221 × 10 ⁻⁴	2.647 × 10 ⁻⁴
TV2	1.686 × 10 ⁻⁴	1.885 × 10 ⁻⁵	2.741E × 10 ⁻⁷	3.583 × 10 ⁻⁸	4.558 × 10 ⁻⁵	1.114 × 10 ⁻⁷	2.697 × 10 ⁻⁵	2.103 × 10 ⁻⁶	4.778 × 10 ⁻⁴	4.870 × 10 ⁻⁵
TV3	3.781 × 10 ⁻⁶	1.081 × 10 ⁻⁵	3.594 × 10 ⁻⁸	3.594 × 10 ⁻⁸	2.719 × 10 ⁻⁷	1.117 × 10 ⁻⁷	4.332 × 10 ⁻⁵	5.771 × 10 ⁻⁵	1.079 × 10 ⁻⁴	6.842 × 10 ⁻⁴
TV4	4.484 × 10 ⁻⁵	4.041 × 10 ⁻⁵	3.682 × 10 ⁻⁸	3.682 × 10 ⁻⁸	1.200 × 10 ⁻⁵	1.145 × 10 ⁻⁷	1.618 × 10 ⁻⁵	2.161 × 10 ⁻⁶	1.829 × 10 ⁻⁴	1.139 × 10 ⁻⁴
TV5	2.862 × 10 ⁻⁵	1.461 × 10 ⁻⁵	4.284 × 10 ⁻⁷	3.966 × 10 ⁻⁸	2.599 × 10 ⁻⁵	1.233 × 10 ⁻⁷	2.328 × 10 ⁻⁶	1.082 × 10 ⁻⁵	2.269 × 10 ⁻⁴	6.980 × 10 ⁻⁵
TV6	7.799 × 10 ⁻⁵	3.940 × 10 ⁻⁵	8.725 × 10 ⁻⁷	1.212 × 10 ⁻⁶	2.420 × 10 ⁻⁵	2.864 × 10 ⁻⁵	6.791 × 10 ⁻⁶	3.228 × 10 ⁻⁶	1.074 × 10 ⁻⁴	7.773 × 10 ⁻⁵
TV7	3.704 × 10 ⁻⁵	3.649 × 10 ⁻⁵	8.093 × 10 ⁻⁸	1.457 × 10 ⁻⁷	2.064 × 10 ⁻⁵	3.622 × 10 ⁻⁵	2.131 × 10 ⁻⁵	2.365 × 10 ⁻⁵	6.902 × 10 ⁻⁵	7.052 × 10 ⁻⁵
TV8	4.183 × 10 ⁻⁵	1.440 × 10 ⁻⁵	3.613 × 10 ⁻⁸	1.627 × 10 ⁻⁸	2.787 × 10 ⁻⁵	1.123 × 10 ⁻⁷	2.12 × 10 ⁻⁶	2.148 × 10 ⁻⁶	3.414 × 10 ⁻⁵	7.216 × 10 ⁻⁵
TV9	8.264 × 10 ⁻⁶	4.188 × 10 ⁻⁵	3.665 × 10 ⁻⁸	1.155 × 10 ⁻⁷	1.354 × 10 ⁻⁵	1.140 × 10 ⁻⁷	1.862 × 10 ⁻⁵	1.185 × 10 ⁻⁴	2.057 × 10 ⁻⁴	1.324 × 10 ⁻⁴
TV11	1.576 × 10 ⁻⁵	1.660 × 10 ⁻⁵	2.022 × 10 ⁻⁷	3.743 × 10 ⁻⁸	1.048 × 10 ⁻⁵	1.164 × 10 ⁻⁷	2.197 × 10 ⁻⁶	2.197 × 10 ⁻⁶	1.324 × 10 ⁻⁴	6.509 × 10 ⁻⁵
TV12	3.350 × 10 ⁻⁵	5.026 × 10 ⁻⁵	1.480 × 10 ⁻⁷	3.653 × 10 ⁻⁸	1.112 × 10 ⁻⁵	1.136 × 10 ⁻⁷	5.124 × 10 ⁻⁵	2.144 × 10 ⁻⁶	1.238 × 10 ⁻⁴	8.557 × 10 ⁻⁵
TV13	3.331 × 10 ⁻⁵	4.311 × 10 ⁻⁵	5.028 × 10 ⁻⁷	1.006 × 10 ⁻⁸	1.054 × 10 ⁻⁵	2.466 × 10 ⁻⁵	4.250 × 10 ⁻⁶	2.186 × 10 ⁻⁶	8.273 × 10 ⁻⁵	9.863 × 10 ⁻⁵
TV14	1.220 × 10 ⁻⁵	3.909 × 10 ⁻⁵	6.639 × 10 ⁻⁸	3.688 × 10 ⁻⁸	2.440 × 10 ⁻⁴	2.640 × 10 ⁻⁵	1.497 × 10 ⁻⁴	2.164 × 10 ⁻⁶	6.735 × 10 ⁻⁵	1.001 × 10 ⁻⁴
TV15	4.629 × 10 ⁻⁴	3.977 × 10 ⁻⁴	3.971 × 10 ⁻⁷	5.791 × 10 ⁻⁷	1.532 × 10 ⁻⁵	3.469 × 10 ⁻⁶	5.173 × 10 ⁻⁶	2.157 × 10 ⁻⁶	2.207 × 10 ⁻⁴	1.204 × 10 ⁻⁴
TV16	1.823 × 10 ⁻⁴	2.165 × 10 ⁻⁵	6.646 × 10 ⁻⁸	8.309 × 10 ⁻⁸	1.148 × 10 ⁻⁷	1.148 × 10 ⁻⁷	1.246 × 10 ⁻⁴	6.839 × 10 ⁻⁵	6.257 × 10 ⁻⁵	4.520 × 10 ⁻⁵
TV17	1.363 × 10 ⁻⁴	1.204 × 10 ⁻⁵	1.802 × 10 ⁻⁷	8.193 × 10 ⁻⁸	1.102 × 10 ⁻⁶	1.132 × 10 ⁻⁷	8.101 × 10 ⁻⁵	8.396 × 10 ⁻⁵	4.782 × 10 ⁻⁵	4.919 × 10 ⁻⁵
TV18	1.112 × 10 ⁻⁴	1.168 × 10 ⁻⁵	1.332 × 10 ⁻⁷	1.666 × 10 ⁻⁸	1.150 × 10 ⁻⁷	1.561 × 10 ⁻⁵	3.876 × 10 ⁻⁶	2.807 × 10 ⁻⁵	4.800 × 10 ⁻⁵	7.025 × 10 ⁻⁵
TV19	1.145 × 10 ⁻⁴	1.507 × 10 ⁻⁵	1.149 × 10 ⁻⁷	3.283 × 10 ⁻⁸	7.240 × 10 ⁻⁶	6.141 × 10 ⁻⁶	1.596 × 10 ⁻⁵	2.091 × 10 ⁻⁵	1.178 × 10 ⁻⁴	5.663 × 10 ⁻⁵
TV20	6.833 × 10 ⁻⁴	1.155 × 10 ⁻⁴	3.261 × 10 ⁻⁷	1.467 × 10 ⁻¹¹	1.261 × 10 ⁻⁵	1.126 × 10 ⁻⁷	4.270 × 10 ⁻⁵	5.792 × 10 ⁻⁵	9.902 × 10 ⁻⁵	9.078 × 10 ⁻⁶
TV21	2.421 × 10 ⁻⁴	1.249 × 10 ⁻⁵	2.327 × 10 ⁻⁷	1.662 × 10 ⁻⁷	6.334 × 10 ⁻⁶	1.148 × 10 ⁻⁷	1.397 × 10 ⁻⁵	1.948 × 10 ⁻⁵	1.731 × 10 ⁻⁴	1.170 × 10 ⁻⁵
TV22	9.802 × 10 ⁻⁵	2.318 × 10 ⁻⁵	3.344 × 10 ⁻⁷	8.360 × 10 ⁻⁸	5.154 × 10 ⁻⁶	1.652 × 10 ⁻⁵	1.237 × 10 ⁻⁵	2.180 × 10 ⁻⁶	9.021 × 10 ⁻⁵	7.986 × 10 ⁻⁵
TV23	6.942 × 10 ⁻⁵	8.943 × 10 ⁻⁷	6.058 × 10 ⁻⁷	6.731 × 10 ⁻⁸	1.163 × 10 ⁻⁷	1.163 × 10 ⁻⁷	2.116 × 10 ⁻⁵	1.797 × 10 ⁻⁵	1.536 × 10 ⁻⁵	7.738 × 10 ⁻⁶
TV24	7.487 × 10 ⁻⁵	2.413 × 10 ⁻⁵	1.970 × 10 ⁻⁷	2.463 × 10 ⁻⁷	1.274 × 10 ⁻⁵	2.735 × 10 ⁻⁵	6.571 × 10 ⁻⁵	4.297 × 10 ⁻⁵	7.536 × 10 ⁻⁵	1.143 × 10 ⁻⁴
TV25	6.346 × 10 ⁻⁵	2.781 × 10 ⁻⁵	4.851 × 10 ⁻⁸	3.593 × 10 ⁻⁸	6.002 × 10 ⁻⁶	5.332 × 10 ⁻⁷	4.155 × 10 ⁻⁶	2.108 × 10 ⁻⁶	1.481 × 10 ⁻⁴	9.324 × 10 ⁻⁵
TV26	7.521 × 10 ⁻⁵	4.687 × 10 ⁻⁵	5.384 × 10 ⁻⁷	3.625 × 10 ⁻⁸	2.681 × 10 ⁻⁵	1.904 × 10 ⁻⁵	1.150 × 10 ⁻⁵	2.127 × 10 ⁻⁶	8.448 × 10 ⁻⁵	8.857 × 10 ⁻⁵
TV27	5.977 × 10 ⁻⁵	8.684 × 10 ⁻⁷	2.451 × 10 ⁻⁷	3.631 × 10 ⁻⁸	8.104 × 10 ⁻⁶	1.129 × 10 ⁻⁷	2.131 × 10 ⁻⁶	2.131 × 10 ⁻⁶	3.963 × 10 ⁻⁵	4.634 × 10 ⁻⁶
TV28	6.773 × 10 ⁻⁵	2.412 × 10 ⁻⁵	1.577 × 10 ⁻⁸	3.776 × 10 ⁻⁸	6.490 × 10 ⁻⁶	1.174 × 10 ⁻⁷	2.216 × 10 ⁻⁶	4.716 × 10 ⁻⁶	8.733 × 10 ⁻⁵	6.797 × 10 ⁻⁵
TV29	5.048 × 10 ⁻⁵	-	1.637 × 10 ⁻⁷	-	9.196 × 10 ⁻⁶	-	2.197 × 10 ⁻⁶	-	8.425 × 10 ⁻⁵	-
TV30	6.371 × 10 ⁻⁵	2.358 × 10 ⁻⁵	4.564 × 10 ⁻⁷	3.735 × 10 ⁻⁸	1.007 × 10 ⁻⁵	2.448 × 10 ⁻⁵	3.854 × 10 ⁻⁵	1.581 × 10 ⁻⁴	1.010 × 10 ⁻⁴	4.165 × 10 ⁻⁵

บรรณานุกรม

- Ansems, A., Gijlswijk, R. v., & Huisman, J. (2002, 6-9 May 2002). *End of life control and management of heavy metals out of electronics*. Paper presented at the Conference Record 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.02CH37273).
- Bi, X., Simoneit, B. R. T., Wang, Z., Wang, X., Sheng, G., & Fu, J. (2010). The major components of particles emitted during recycling of waste printed circuit boards in a typical e-waste workshop of South China. *Atmospheric Environment*, *44*(35), 4440-4445. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.040>
- Brian Gullett, K., William Linak, P., Touati, A., Shirley Wasson, J., Gatica, S. and Charles King. (2007). Characterization of air emissions and residual ash from open burning of electronic wastes during simulated rudimentary recycling operations. *J Mater Waste Management*, *9*, 69-79.
- Brigden, K., Labunska, I., Santillo and D.andAllsopp, M. . (2005). *Recycling of electronic wastes in China and India: workplace and environmental contamination*. Retrieved from
- Deng, J., Guo, J., Zhou, X., Zhou, P., Fu, X., Zhang, W., & Lin, K. (2014). Hazardous substances in indoor dust emitted from waste TV recycling facility. *Environ Sci Pollut Res Int*, *21*(12), 7656-7667. doi:10.1007/s11356-014-2662-9
- Deng, W. J., Louie, P. K. K., Liu, W. K., Bi, X. H., Fu, J. M., & Wong, M. H. (2006). Atmospheric levels and cytotoxicity of PAHs and heavy metals in TSP and PM2.5 at an electronic waste recycling site in southeast China. *Atmospheric Environment*, *40*(36), 6945-6955. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.032>
- Fang, W., Yang, Y., & Xu, Z. (2013). PM10 and PM2.5 and health risk assessment for heavy metals in a typical factory for cathode ray tube television recycling. *Environ Sci Technol*, *47*(21), 12469-12476. doi:10.1021/es4026613
- Huang, C. L., Bao, L. J., Luo, P., Wang, Z. Y., Li, S. M., & Zeng, E. Y. (2016). Potential health risk for residents around a typical e-waste recycling zone via inhalation of

- size-fractionated particle-bound heavy metals. *J Hazard Mater*, 317, 449-456.
doi:10.1016/j.jhazmat.2016.05.081
- Nnorom, I. C., Osibanjo, O., & Ogwuegbu, M. O. C. (2011). Global disposal strategies for waste cathode ray tubes. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 275-290. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.007>
- Puangprasert, S., & Prueksasit, T. (2019). Health risk assessment of airborne Cd, Cu, Ni and Pb for electronic waste dismantling workers in Buriram Province, Thailand. *J Environ Manage*, 252, 109601. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109601
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 408(2), 183-191.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>
- Ruan, J., Hu, J., Xu, Z., & Zhang, J. (2016). Exposure risks of noise and heavy metals in dismantling lines for recovering waste televisions. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4469-4476. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.079>
- Singh, M., Thind, P. S., & John, S. (2018). Health risk assessment of the workers exposed to the heavy metals in e-waste recycling sites of Chandigarh and Ludhiana, Punjab, India. *Chemosphere*, 203, 426-433.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.138>
- Song, Q., Zeng, X., Li, J., Duan, H., & Yuan, W. (2015). Environmental risk assessment of CRT and PCB workshops in a mobile e-waste recycling plant. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(16), 12366-12373. doi:10.1007/s11356-015-4350-9
- Tongkaow, P., Prueksasit, T., & W., a. S. (2017). *Material flow of information electronic waste dismantling in rural area of northeastern Thailand*. Paper presented at the 139th The HER International Conference, Osaka, Japan.
- U.S. EPA. (1989). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): vol. I. In *Human Health Evaluation Manual (HHEM) (Part A, Baseline Risk Assessment)*. Washington, D.C: US Environmental Protection Agency (USEPA).
- U.S. EPA. (1991). *Role of the Baseline Risk Assessment in Superfund Remedy Selection Decisions*. Retrieved from
- U.S. EPA. (2001). Appendix C Risk Characterization Equations. In.

- U.S. EPA. (2009). Human Health Evaluation Manual (Part F) Final. In *Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I*. Washington, D.C. : Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2011). *Exposure factors handbook 2011 Edition*. Washington DC.
- U.S. EPA. (2017). Basic Information of Air Emissions Factors and Quantification.
- Xue, M., Yang, Y., Ruan, J., & Xu, Z. (2012). Assessment of noise and heavy metals (Cr, Cu, Cd, Pb) in the ambience of the production line for recycling waste printed circuit boards. *Environ Sci Technol*, 46(1), 494-499. doi:10.1021/es202513b
- Yu, G., Tian, X., Wu, Y.-F., Zhe, T., & Lei, L. (2015). Recent development of recycling lead from scrap CRTs: A technological review. *Waste management (New York, N.Y.)*, 57. doi:10.1016/j.wasman.2015.09.004
- Zheng, J., Chen, K.-h., Yan, X., Chen, S.-J., Hu, G.-C., Peng, X.-W., . . . Yang, Z.-Y. (2013). Heavy metals in food, house dust, and water from an e-waste recycling area in South China and the potential risk to human health. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 96, 205-212.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.06.017>
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม. (2546). มาตรฐานคุณภาพอากาศและเสียง
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม. (2551). คู่มือการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม. (2558). การจัดการซากผลิตภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย. <http://infofile.pcd.go.th/haz/Training5-Basel.pdf?CFID=3275380&CFTOKEN=80240084>
- กองประเมินผลกระทบต่อสุขภาพ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2558). แนวทางการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยง กรณีขยะอิเล็กทรอนิกส์. Retrieved from
- ศพนานต์ โกฎจนวนรณ และ นิจารีย์ สารพันธุ์. (2559). การประเมินความเสี่ยงสุขภาพของบุคคลที่คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์จากการ สัมผัสปรอทและสารหนูในจังหวัดบุรีรัมย์.
- นิชชา บุรณสิงห์. (2559). ขยะอิเล็กทรอนิกส์. Retrieved from
- ดุสิต เครื่องาม. (2542). สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการทำงาน.
- ทรศนีย์ พุกษาสีหิ. (2557). เอกสารประกอบการสอนการจัดการความเสี่ยง. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พัลลอง มั่นดี. (2558). ปัญหาการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์. In.

- ลาวัลย์ ศรีพงษ์. (2552). เทคนิค *ICP-MS* ในงานเภสัชวิเคราะห์. ไทยโกซ์ซันนิพนธ์.
- ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย. (2563). โครงการพัฒนารูปแบบระบบการรวบรวมขนส่ง และจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และของเสียอันตรายชุมชน. Retrieved from สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. (2560). การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย. Retrieved from สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ. (2556). สถานการณ์และผลกระทบจากซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และแนวทางการจัดการ. Retrieved from สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2559). คู่มือการปฏิบัติงานเพื่อการตรวจประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารสำหรับเจ้าหน้าที่. Retrieved from สจิติรา วาสนาดำรงดี. (2558). แนวคิดในการจัดทำร่างกฎหมายการจัดการซากผลิตภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย. Paper presented at the ขยะอิเล็กทรอนิกส์: จัดการอย่างไรให้ปลอดภัย?”
- สจิติรา วาสนาดำรงดี และ ปเนต มโนมัยวิบูลย์. (2555). ตอนที่ 1 ขยะอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาใหม่ของสังคมไทยยุคไฮเทค. In การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์.
- สจิติรา วาสนาดำรงดี และ ปเนต มโนมัยวิบูลย์. (2558). แนวคิดในการจัดทำร่างกฎหมายการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย. Retrieved from
- สุธิมา พวงประเสริฐ. (2558). การรับสัมผัสโลหะหนักผ่านการหายใจ และการประเมินความเสี่ยงสุขภาพของบุคคลที่คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ จังหวัดบุรีรัมย์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	คณานต์ โกลัญจนาวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	13 พฤศจิกายน 2537
สถานที่เกิด	ยะลา
วุฒิการศึกษา	2560 - 2562 : สหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2556 - 2559 : ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	52/593 ม.7 หมู่บ้านเมืองเอก ต.หลักหก อ.เมืองปทุมธานี จ.ปทุมธานี
ผลงานตีพิมพ์	คณานต์ โกลัญจนาวรรณ, นิธารีย์ สารทพันธุ์, กมลทิพย์ ชันชะลี และ ทรรศนีย์ พุกษาสีทธิ. 2563. "การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้รื้อ แยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่สัมผัสโลหะหนักผ่านทางผิวหนังในจังหวัดบุรีรัมย์." วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม 2563 คณานต์ โกลัญจนาวรรณ และ ทรรศนีย์ พุกษาสีทธิ. 2563. "ปริมาณโลหะ หนักในฝุ่นขนาดต่ำกว่า 10 ไมโครเมตรจากการรื้อแยกซากโทรศัพท์แบบไม่ ถูกสุขลักษณะ." เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 19. หน้า 370 - 376