บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฝุ่นละอองในบรรยากาศ

ฝุ่นละอองเป็นสารที่มีความหลากหลายทางด้านกายภาพและองค์ประกอบอาจมีสภาพเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ (สุธีลา ตุลยะเสถียร, โกศล วงศ์สวรรค์ และ สถิต วงศ์สวรรค์, 2544) ฝุ่นละอองที่อยู่ในบรรยากาศมีตั้งแต่ ขนาด 0.02 ไมโครเมตร จนถึง ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า 500 ไมโครเมตร โดยที่ฝุ่นละอองขนาดเล็กจะแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้นาน และจะแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมากขึ้นหากมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น การไหลเวียนของอากาศ กระแสลมเป็นต้น ส่วนฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร) อาจแขวนลอยอยู่ในอากาศได้เพียง 2-3 นาที ซึ่งฝุ่นละอองในบรรยากาศมีแหล่งที่มาที่สำคัญ 2 แหล่ง คือ ส่วนหนึ่งมาจากธรรมชาติ เช่น การเกิดภูเขาไฟระเบิด และอีกส่วนหนึ่งมาจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การคมนาคม การก่อสร้างเป็นต้น

ประเภทของฝุ่นละออง

การแยกขนาดของฝุ่นละอองโดย องค์กรป้องกันสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (U.S.EPA, 1982) จำแนกประเภทของฝุ่นไว้ 2 ชนิด ได้แก่

1. ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็ก (fine particulate matter) เป็นฝุ่นละอองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5ไมโครเมตร ฝุ่นละอองประเภทนี้เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์อย่างมาก

2. ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่ (coarse particulate matter) เป็นฝุ่นละอองมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 2.5 ไมโครเมตร

เคนเนธ และเซซิล (Kenneth & Cecil, 1968)ได้แบ่งชนิดของฝุ่นละอองตามขนาดเป็นฝุ่นละอองอย่างละเอียด จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100ไมโครเมตรและ ฝุ่นละอองอย่างหยาบจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมโครเมตร

โรเบิร์ตและเออร์วิง (Robert and Irving, 1974) ได้ทำการศึกษาฝุ่นละอองในอากาศและทำการแบ่งประเภทได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ฝุ่นละอองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร เรียกว่า " Aitken Particles" ฝุ่นละอองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.0 ไมโครเมตรเรียกว่า "Large Particle" ฝุ่นละอองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 1.0 ไมโครเมตร เรียกว่า " Giant Particle"

องค์ประกอบของฝุ่นละออง

จากการศึกษาโดยเก็บตัวอย่างฝุ่นสัปดาห์ละสองครั้ง จากหลายสถานีทั่วสหรัฐอเมริกา ทั้งในเมืองและนอกเมืองของ Robert and Irving (1974) พบว่าฝุ่นละออง ฝุ่นละอองมีองค์ประกอบแสดงในตาราง ที่ 1

ตาราง ที่ 1 แสดงองค์ประกอบของฝุ่น

	จำนวนสถานี	ปริมาณความเข้มข้น ($\mu g/m^3$)	
		ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด
สถานีในชุมชน			
Particles	291	105(90)	1254
Fraction :			
Benzene-soluble organic	218	6.8	-
Nitrates	96	2.6	39.7
Sulfates	96	10.5	101.2
Ammonium	56	1.3	75.5
Antimony	35	0.001	0.160
Arsenic	133	0.02	-
Beryllium	100	0.0005	0.010
Bismuth	35	0.0005	0.016
Cadmium	35	0.002	0.420

ตารางที่ 1 (ต่อ)

	จำนวนสถานี	ปริมาณความเข้มข้น ($\mu g/m^3$)	
		ค่า เฉลี่ย	ค่าสูงสุด
Chromium	103	0.015	0.330
Cobalt	35	0.0005	0.060
Copper	103	0.09	10.00
Iron	104	1.58	22.00
Lead	104	0.79	8.60
Manganese	103	0.10	9.08
Molybdenum	35	0.005	0.78
Nickel	103	0.084	0.460
Tin	85	0.02	0.50
Titanium	104	0.04	1.10
Vanadium	99	0.050	2.200
Zinc	99	0.67	58.00
Nonurban stations			
Particle	32	37(28)	312
Fraction:			
Benzene-soluble organic	28	1.2	-
Arsenic	24	0.005	0.02

ที่มา:ดัดแปลงจาก Robert and Irving (1974)

ผลกระทบของฝุ่นละอองต่อมนุษย์

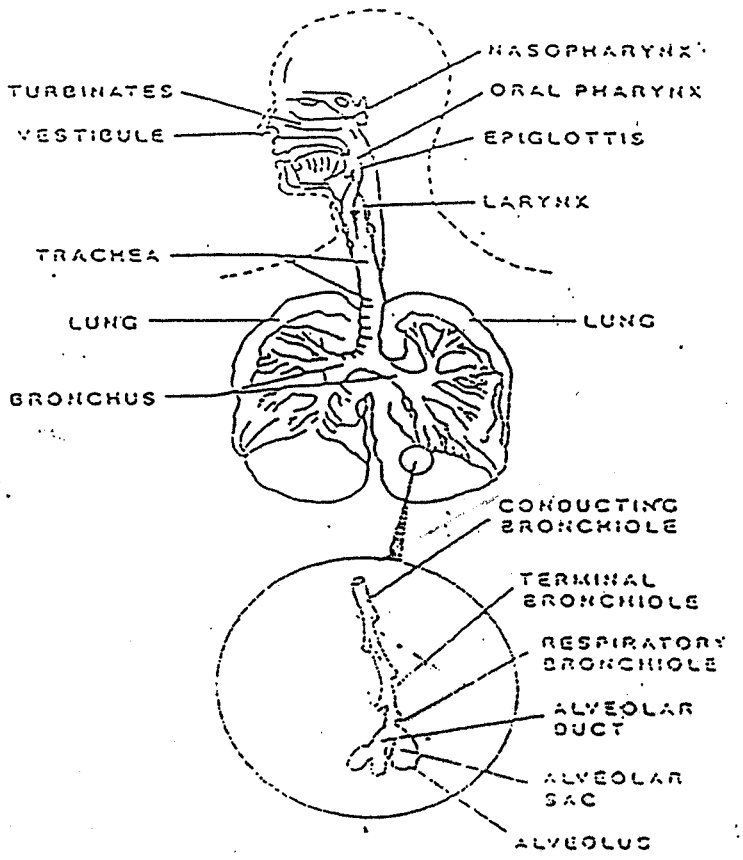
ฝุ่นละอองเป็นสารมลพิษในอากาศที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ ทั้งนี้อันตรายของฝุ่นละอองต่อมนุษย์ขึ้นอยู่กับ

- ตำแหน่งของการสะสมตัวของฝุ่นละอองในปอดซึ่งสัมพันธ์กับขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของฝุ่นนั้น

- ผลกระทบของฝุ่นละอองที่มีต่อเนื้อเยื่อซึ่งจะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองนั้น

อันตรายจากฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร เนื่องจากฝุ่นละอองขนาดเล็กนี้สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์โดยผ่านระบบทางเดินหายใจและอาจเกิดการสะสมตัวภายนถุงลมปอดทำให้เกิดการอักเสบประมาณว่า ร้อยละ 50 ของฝุ่นละอองขนาดระหว่าง 0.01 และ 0.1 ไมโครเมตรได้ตกค้างอยู่ในส่วนของปอดดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งฝุ่นเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ได้ เนื่องมาจาก

1. อนุภาคฝุ่นเป็นพิษเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีหรือคุณสมบัติทางกายภาพ
2. อนุภาคฝุ่นส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ
3. อนุภาคฝุ่นอาจดูดสารพิษเข้าไปในตัว



ภาพที่ 1 แสดงระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ (Hines, Ghosh, Loyalka, & Wardar, 1993)

โดยที่พบว่า ฝุ่นที่มีขนาด 5-30 ไมโครเมตรจะตกค้างอยู่บริเวณจมูกและคอหอยส่วนจมูก ฝุ่นที่มีขนาด 1-10 ไมโครเมตรจะตกค้างอยู่บริเวณคอหอยและหลอดลม และฝุ่นที่มีขนาด 1 ไมโครเมตรและเล็กกว่า จะตกค้างบริเวณถุงลมปอด (มาริษา เพ็ญสุต ภู่ภิญโญกุล, 2542 อ้างอิงจาก Casarett, 1974)

ตัวอย่างฝุ่นละอองที่เป็นต้นเหตุทำให้เนื้อเยื่อของปอดเกิดการอักเสบเป็นแผลพร้อมทั้งชื่อของโรค ที่เกิดขึ้นแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สารที่เป็นต้นเหตุก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ (Kupcheella & Hyland, 1989)

Material	Disease Designation
Inorganic fiber and dust	
Crytalline Silica	Silicosis
Asbetos	Asbestosis
Talc	Talcosis
Coal (pure)	Coal worker pneumoconisis
Kaolin	Kaolinosis
Graphite	Graphite lung
Organic fiber and dust	
Cellulose	Bagassosis
Cotton	Byssinosis
Flax	Byssinosis
Hemp	Byssinosis
Metallic Fumes	
Tin oxide	Stannosis
Iron oxide	Siderosis
Berylium oxide	Berylliosis

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นบริเวณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้วิธีการเรืองรังสีเอกซ์ ทั้งระบบ WDXRF และ EDXRF พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุหลักในฝุ่นเป็นดังนี้ ธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอน โปแตสเซียม แคลเซียม เหล็ก และกำมะถัน มีค่าเป็น ร้อยละโดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังนี้ 6.32, 22.04, 1.08, 10.36, 1.82 และ 4.17 สำหรับธาตุปริมาณน้อย บางธาตุ เช่น ตะกั่ว แมงกานีส โบรมีน นิกเกิล สังกะสี ทิเทเนียม และทองแดง มีค่า เป็น 2.084, 0.272, 0.512, 0.443, 3.635, 1.775 และ 2.066 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับฝุ่นบริเวณอำเภอศรีราชาจังหวัด ชลบุรี พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุหลักในฝุ่นเป็นดังนี้ ธาตุอะลูมีเนียม ซิลิกอน โปแทสเซียม แคลเซียม เหล็ก และกำมะถัน มีค่าร้อยละโดยน้ำหนักตามลำดับดังนี้ 7.41, 32.18, 2.87, 2.72, 2.07 และ 2.31 สำหรับธาตุปริมาณน้อยบางธาตุ เช่น ตะกั่ว แมงกานีส โบรมีน นิกเกิล สังกะสี ไททาเนียม และทองแดง มีค่าเป็น 0.486, 0.551, 0.428, 0.523, 0.205, 2.944 และ 0.604 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ (อุทัย ติยะวิสุทธิ์ศรี, 2535)

ในการศึกษาของ วิชัย อนุรักษ์ฤานนท์ (2537) ได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นจากอากาศ บริเวณหน้าศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และตัวอย่างฝุ่นจาก บริเวณโรงพยาบาลแม่เมาะ และสำนักงานสาธารณสุขอำเภอสบป๊าด จังหวัด ลำปาง โดยใช้วิธี นิวตรอนแอคติเวชัน พบว่า ตัวอย่างที่เก็บในกรุงเทพ ฯ มีปริมาณวานาเดียมและสารหนูอยู่ในช่วง 50 ถึง 630 ไมโครกรัมต่อกรัม ในขณะที่ตัวอย่างที่เก็บจากจังหวัดลำปางมีวานาเดียมและสารหนูอยู่ในช่วง น้อยกว่า 6 ไมโครกรัมต่อกรัม

ในการศึกษาเรื่องการประเมิณความเสี่ยงจากการสัมผัสฝุ่นโครเมียมแขวนลอยขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรโดยระบบทางเดินหายใจโดยใช้เครื่องนิวตรอนแอคติเวชันในการวิเคราะห์ธาตุโครเมียม พบว่าปริมาณฝุ่นโครเมียมแขวนลอยขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร บริเวณโรงเรียนเขาดินและสถานีอนามัยบางผึ้งมีค่า 0.052 และ 0.053 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ความเสี่ยงที่เกิดจากฝุ่นโครเมียมแขวนลอยขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรโดยระบบทางเดินหายใจของชุมชนทั้งสอง แห่งมีค่าความเสี่ยง 0.09 (เริงณรงค์ วิเวกวินย์, 2545)

จากการศึกษาปริมาณฝุ่นที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ โดยทำการตรวจวัดฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรและปริมาณฝุ่นรวมในบริเวณสถานีตรวจ 4 จุด คือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรมประชาสัมพันธ์, หมวดการทางพระสมุทรเจดีย์ และวัดมณฑป พบว่าในบริเวณสถานีตรวจวัดทั้ง 4 จุด ในช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือมีปริมาณฝุ่นทั้งสองประเภทสูงกว่าในช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ส่วนการศึกษาการกระจายตัวของโลหะในฝุ่นรวมและฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า

10 ไมโครเมตร พบว่า ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง มีการกระจายตัวในฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มากกว่าในฝุ่นขนาดใหญ่ ส่วนแมงกานีสมีการกระจายตัวในฝุ่นขนาดใหญ่มากกว่าในฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร และเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของฝุ่นโลหะทั้งตะกั่ว สังกะสี และทองแดง พบว่าการกระจายตัวของโลหะในช่วงมรสุมตะวันตกเฉียงใต้มีค่ามากกว่าในช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนแมงกานีสไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน (อรุบล โชติพงษ์, 2541)

การศึกษาการปนเปื้อนและการประเมินความเสี่ยงระบบทางเดินหายใจของโลหะหนักในฝุ่นละอองในเขตกรุงเทพมหานคร (ศึกษากรณีตำรวจจราจร) พบว่าค่าเฉลี่ยของ ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีในฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 73.22,1.25 ng/m^3 และ 15.33 ng/m^3 ตามลำดับ (พูนทรัพย์ นรมิตร, 2544)

จากการตรวจวัดฝุ่นรวมเฉลี่ย 24 ชั่วโมงที่โรงเรียนแม่เมาะ และหมู่บ้านหัวฝายโดยกรมควบคุมมลพิษ (2543) พบว่าฝุ่นรวมมีปริมาณอยู่ในช่วง 0.011-0.107 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยพบสูงสุดที่โรงเรียนแม่เมาะวิทยา ขณะที่ฝุ่นขนาดเล็กที่ทำการตรวจวัดในพื้นที่แม่เมาะ 8 แห่ง พบว่าฝุ่นขนาดเล็กเฉลี่ย 24 ชั่วโมงตรวจวัดได้อยู่ในช่วง 9-512 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยพบสูงสุดที่บริเวณสถานีท่าสี ซึ่งสูงเป็น 4.3 เท่าของค่ามาตรฐาน ขณะที่บริเวณหมู่บ้านหัวฝาย พบฝุ่นรวมอยู่ในช่วง 0.041-0.105 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และฝุ่นขนาดเล็กพบอยู่ในช่วง 13-204 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

กรมอนามัย (2539) ศูนย์อนามัยสิ่งแวดล้อมเขต 5 นครราชสีมาได้ศึกษาสถานการณ์ฝุ่นละอองขนาดเล็กในโรงเรียนย่านอุตสาหกรรมโรงโม่หิน จังหวัดสุรินทร์และบุรีรัมย์โดยตรวจวัดคุณภาพอากาศที่โรงเรียนบ้านกะทม ต.นาบัว อ.เมือง จ.สุรินทร์ และโรงเรียนบางพลวง ต.สวายจีก อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ พบว่าสถานการณ์ฝุ่นละอองขนาดเล็ก ณ โรงเรียนบ้านพลวง มีค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงเกินมาตรฐานคุภาพอากาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2538 เท่ากับร้อยละ 53 ของจำนวนตัวอย่างที่ตรวจวัดได้ทั้งหมด และโรงเรียนบ้านกะทม มีค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงเกินมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 40 ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่วัดได้ และยังถือได้ว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งนับได้ว่าค่ามาตรฐานเป็นร้อยละที่สูง ช่วงเวลาที่มีปริมาณฝุ่นสูงมักเป็นช่วงเวลากลางคืน เวลาประมาณ 19.00-01.00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่มีสภาพภูมิอากาศที่ทำให้การกระจายตัวของอากาศเป็นไปได้ช้า ทำให้ปริมาณฝุ่นละอองมีความเข้มสูงไปด้วย

จากการศึกษาของ ดาลเลน (Daalen, 1991)ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของโลหะในฝุ่นที่เมืองริจน์มอนด์ในประเทศเนเธอร์แลนด์ จากการเก็บตัวอย่างฝุ่นาตามช่วงขนาดต่าง ๆ คือขนาดน้อยกว่า 7.02, 3.0-7.2, 5-3.0, 0.95-1.5 และ 0.01-0.50 ไมโครเมตร พบว่าในช่วงขนาดของฝุ่นที่มีปริมาณโลหะประเภทอาร์เซนิค แคดเมียม โคบอลล์ โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นีกเกิล ตะกั่ว

ซีลีเนียม วาเนเดียมและสังกะสีมากที่สุดคือ ช่วง 0.01-0.50 ไมโครเมตร นั่นคือ โลหะทุกชนิดที่ทำการทดลองจะพบในฝุ่นขนาดเล็กนั่นเอง

จากการศึกษาของ ลีออย และวาลแมน (Lioy & Waldman, 1990) ได้ศึกษาความเข้มของฝุ่นละอองที่มีขนาด 10 ไมโครเมตรในย่านอุตสาหกรรมและย่านที่พักอาศัยของเมืองเล็ก ๆ ในรัฐนิวเจอร์ซี ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดฝุ่นไว้ในอาคาร นอกอาคาร และให้บุคคลผู้ไม่สูบบุหรี่สวมใส่เป็นเวลา 2 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นละอองที่ติดตามตัวบุคคล ภายนอกอาคารและภายในอาคารมีค่า 16, 48 และ 42 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับฝุ่นละอองที่ติดตามตัวบุคคลที่เก็บตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมงคิดเป็นร้อยละ 8.8 ของกลุ่มตัวอย่างซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 150 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ฝุ่นนอกอาคารมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยมากกว่าฝุ่นในอาคาร ทั้งนี้เนื่องจากฝุ่นนอกอาคารเป็นฝุ่นหยาบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรปะปนอยู่มากมาย การศึกษาในครั้งนี้ขาดกลุ่มตัวอย่างที่สูบบุหรี่เข้ามามีส่วนร่วมด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า มีเพียง 1 วันเท่านั้นที่มีค่าเฉลี่ยถึงค่าสูงสุดของค่ามาตรฐานฝุ่นที่มีขนาดเล็กว่า 10 ไมโครเมตรตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง ซึ่งวันดังกล่าวส่งผลให้ระดับของค่าเฉลี่ยในกลุ่มในอาคารและกลุ่มบุคคลมีค่าสูงตามไปด้วย อาจเนื่องมาจากฝุ่นนอกอาคารฟุ้งเข้ามาในกลุ่มในอาคารทั้งสองกลุ่ม

ในการศึกษาเรื่องผลกระทบของฝุ่นละอองที่มีผลต่อสุขภาพในเขตกรุงเทพมหานคร ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าฝุ่นละอองในกรุงเทพฯมีความสัมพันธ์กับผลกระทบทางสุขภาพของประชาชนโดยมีผลต่อภาวะโรคระบบทางเดินหายใจ และมีระดับความรุนแรงใกล้เคียงกับที่พบจากการศึกษาที่เมืองต่าง ๆ ทั่วโลกซึ่งน่าจะเป็นเหตุผลเพียงพอที่จะสรุปได้ว่าปัญหาผลกระทบของฝุ่นละอองต่อสุขภาพของประชาชนซึ่งได้ถูกค้นพบในที่อื่น ๆ กำลังจะเกิดขึ้นในกรุงเทพมหานคร เช่นเดียวกัน ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าระดับของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรในกรุงเทพฯในปัจจุบันอาจทำให้คนในเขตกรุงเทพฯตายก่อนวัยอันควรจากการสัมผัสระยะสั้น (ระยะเวลาประมาณ 2-3 ปี) กับฝุ่นละอองในอากาศนอกอาคารถึง 4,000 ถึง 5,500 รายในแต่ละปี (ประมาณการว่ามีประชากร 10 ล้านคน) (Chestnut, Ostro, Vichit-Vadakan, & Smith, 1998)

จากการศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์ตัวอย่างอากาศบนกระดาษกรองโดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์แบบกระจายพลังงาน ของบริษัท Kevex (KevexSpectrace, 1999)โดยทำการทดลองใช้เครื่องEDXRF ที่มีแหล่งพลังงานกระตุ้นมาจากหลอดรังสีเอกซ์และใช้หัววัด Si(Li) พบว่าเครื่อง EDXRF สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่างฝุ่นละอองในอากาศได้เป็นอย่างดีโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 % และค่า Lower Limit of Detection อยู่ในช่วงนาโนกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร

จากการศึกษาเรื่องแหล่งกำเนิดฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรและ Volatile Organic Gases ในบรรยากาศที่จอดเรือตามชายฝั่งอ่าวทางตอนใต้ของแคลิฟอร์เนีย ในปี 1987 พบว่า PM10 มีแล่งกำเนิดมาจากดิน (primary geological material) และการปลดปล่อยจากรถยนต์ (primary vehicle exhaust) โดยพบ PM10 อยู่ในช่วง 20-32% และพบ PM2.5 อยู่ระหว่าง 50-67% (Watson, Chow, Lu & Ferler, 1994)

ในการศึกษาคุณสมบัติของเครื่อง EDXRF เพื่อการวิเคราะห์ตัวอย่างอากาศโดยใช้เครื่อง Tracor EDXRF และเครื่อง MiniPal EDXRF พบว่าเครื่อง Tracor EDXRF ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยที่ 20% ซึ่งขึ้นอยู่กับธาตุและความเข้มข้นของธาตุ และค่าความแม่นยำของการวิเคราะห์ดีกว่า 5% ส่วนเครื่อง MiniPal EDXRFมีค่า Detection Limits อยู่ในช่วง 3 ng cm^{-2} สำหรับการวัดธาตุ Al และ Si และค่า Detection Limits จะดีขึ้นถ้าใช้สภาพแวดล้อมในการวัดเป็นฮีเลียม (Samek, Injuk, Espen and Grieken, 2002)

การศึกษาของ ฮอร์เลอร์ (Horler, 1989) ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุ As และ Se ในผักและสมุนไพรโดยใช้เครื่อง x – ray fluorescence พบว่าสำหรับตัวอย่าง 1 กรัม ค่า Detection Limits ของเครื่องเท่ากับ 0.1 ไมโครกรัม สำหรับธาตุ As และ Se ความถูกต้องและความแม่นยำในการวิเคราะห์นี้ ดีกว่า 3%

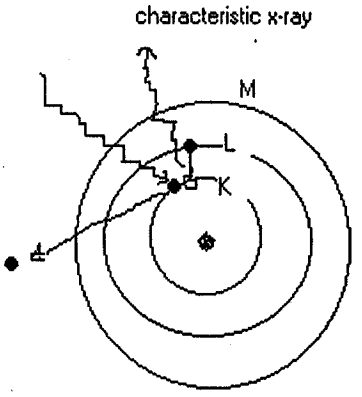
จากการศึกษาวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่าง ดิน น้ำ และ Sewage Sludge โดยใช้เครื่อง Total-reflection X-Ray fluorescence Spectrometry เปรียบเทียบกับเครื่อง ICP พบว่าเครื่องTXRF ทำงานได้อย่างรวดเร็วสามารถวัดธาตุได้ครั้งละหลาย ๆธาตุ ตัวอย่างที่นำมาใช้ก็ไม่มากและผลการวิเคราะห์เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง ICP ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน (Mukhtar, Haswell, Ellis and Hawke, 1991)

เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

หลักการของเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

เมื่อยิงอนุภาคพลังงานสูง เช่น โฟตอน เข้าไปกระทบกับอิเล็กตรอนในวงโคจร (Shell)ชั้นในเช่น ชั้น K ของอะตอม ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงาน อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น K จะมีพลังงานสูงขึ้นจนสามารถชนะแรงยึดเหนี่ยว และหลุดออกจากวงโคจรชั้น K ได้ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ในชั้น K อิเล็กตรอนจากวงโคจรถัดไปเช่น ชั้น L ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าจะกระโดดเข้ามาแทนที่ พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า " รังสีเอกซ์ (Fluorescent x- ray)" กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์แสดงดังภาพที่ 2

เนื่องจากพลังงานของรังสีเอกซ์เรืองนั้นเป็นค่าเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นจึง เรียกรังสีเอกซ์ อีกชื่อหนึ่งว่า " รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic x – ray)" จากหลักการนี้จึงสามารถวิเคราะห์ธาตุทั้งเชิงคุณภาพและ เชิงปริมาณ ได้โดยการวัดค่าพลังงาน และความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นจากตัวอย่าง

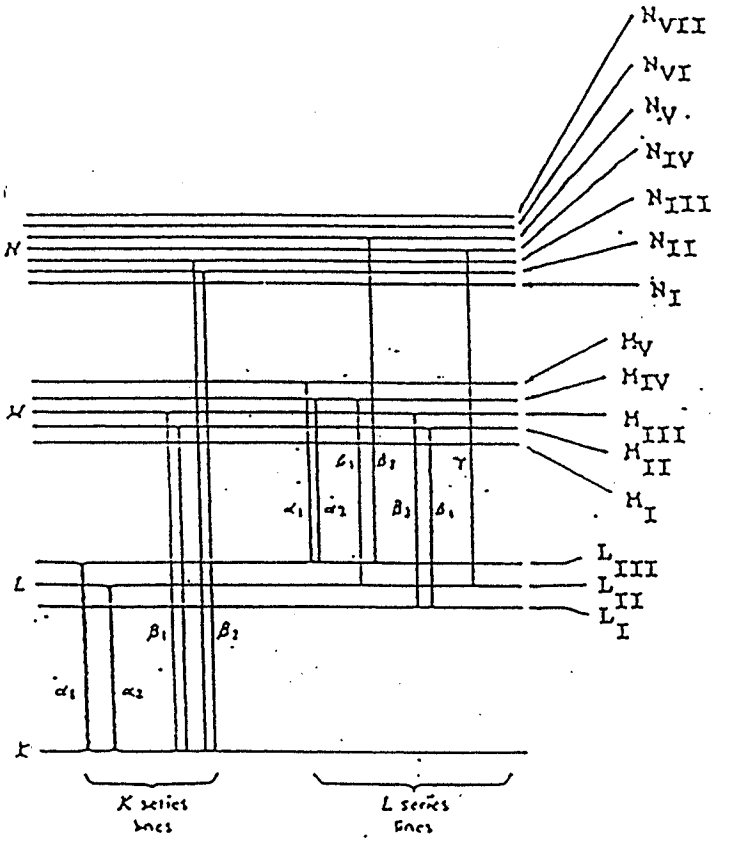


ภาพที่ 2 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เรือง

จากภาพที่ 2 ถ้าพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจร L มีค่าเท่ากับ E_L และพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจร K มีค่าเท่ากับ E_K ถ้ากำหนดให้ E แทนพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้น อาจเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E = E_L - E_K$$

เนื่องจากในแต่ละวงโคจรหลัก (L, M , N .....) ยังมีการจัดวงโคจรย่อยๆอีก(Sub – shell) ดังนั้นในการเกิดรังสีเอกซ์เรือง จึงทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้หลายพลังงาน แล้วแต่ว่าการแทนที่ของอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นจากระดับใด ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงการแทนที่ของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Dziunikowski, 1989)

การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์

การที่อะตอมจะปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาจะต้องเกิดจากการกระตุ้นโดยอาศัยพลังงานจากภายนอกอะตอมหรือ อาศัยการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอมการกระตุ้นโดยอาศัยพลังงานจากภายนอกได้แก่

1. การกระตุ้นด้วยอนุภาคพลังงานสูง มักได้แก่ อิเล็กตรอนหรือโฟตอน อนุภาคจะถูกปล่อยมาจากแหล่งอื่นเคลื่อนที่มาอย่างรวดเร็วและชนกับอิเล็กตรอนภายในอะตอมและทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าจะตกลงมาแทนที่และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์

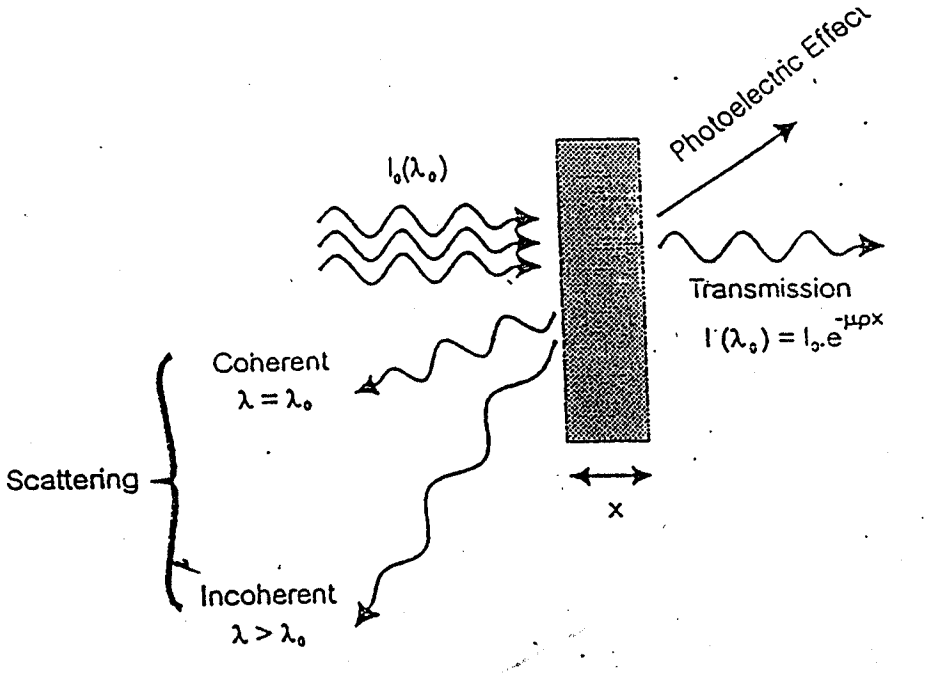
2. การกระตุ้นโดยโฟตอนพลังงานสูง โดยที่โฟตอนอาจเป็นรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาที่มาจากแหล่งอื่น

3. การกระตุ้นโดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอม

อะตอมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในจะต้องเป็นอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดรังสีเอกซ์ได้ เช่น การสลายตัวแบบจับอิเล็กตรอน (electron capture)

การดูดกลืนรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่พุ่งมาสู่วัตถุจะเกิดอันตรกิริยาได้ 2 ลักษณะคือ การดูดกลืนและการกระเจิง การดูดกลืนนั้นจะมีความสำคัญกับการกระตุ้นสารตัวอย่างและมีความสัมพันธ์กับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาส่วนการกระเจิงจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสัญญาณพื้นหลัง การดูดกลืนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4

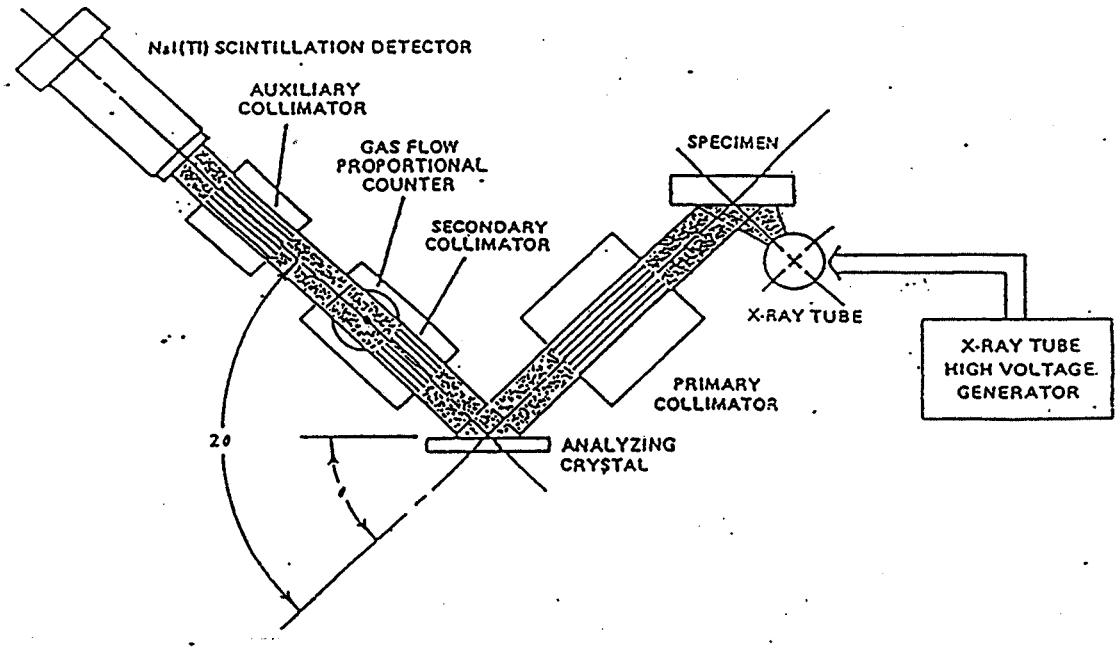


ภาพที่ 4 แสดงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีเอกซ์เดินทางผ่านวัตถุ (Jenkins, 1981)

วิธีวิเคราะห์โดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

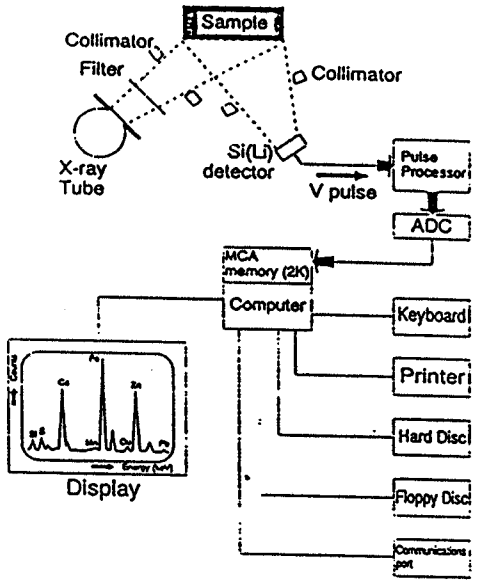
เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ที่สำคัญมี 2 วิธี คือ

1. Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence (WDXRF) เป็นวิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีแยกความยาวคลื่นโดยผลึก แสดงดังภาพที่ 5 วิธีนี้มีข้อได้เปรียบคือ Resolution สูง แต่มีข้อเสียเปรียบหลายประการ เช่น ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานเนื่องจากต้องหมุนหัววัดรังสีไปตามมุมตั้งแต่ 0 องศา จนถึง 180 องศา



ภาพที่ 5 แสดงระบบ WDXRF (Dziunikowski, 1989)

2. Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) เป็นการวิเคราะห์พลังงานของ X-ray fluorescence โดยใช้หัววัดรังสีทำหน้าที่วิเคราะห์พลังงาน แสดงดังภาพที่ 6 วิธีนี้มีข้อได้เปรียบคือรวดเร็ว ไม่ทำลายตัวอย่าง แต่ Resolution จะไม่ดีเท่าระบบ WDXRF

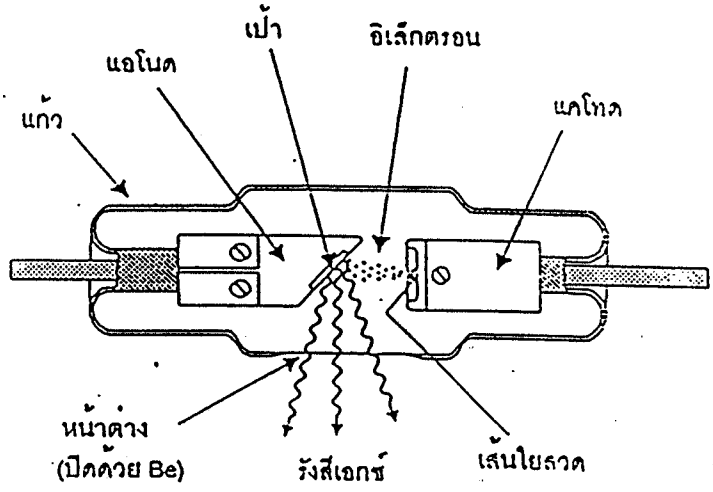


ภาพที่ 6 แสดงระบบ EDXRF (Oxford Instument industrial group, 1993)

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่อง EDXRF เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง EDXRF ซึ่งมีดังนี้

หลอดรังสีเอกซ์

หลอดรังสีเอกซ์ แสดงดังภาพที่ 7 ภายในหลอดเป็นสูญญากาศ มีขั้วแคโทดและแอโนดที่แอโนด มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกและเคลือบด้วยธาตุที่เป็นเป้า เป้า (target) ซึ่งจะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีตามพลังงานที่ต้องการ เช่น อาจเป็นทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) ทังสเตน (W) เป็นต้น เมื่อทำให้เส้นลวดที่แคโทดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมาอิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด ในการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหรือแอโนดนั้นอิเล็กตรอนจะถูกทำให้ชะลอความเร็วลงบ้างเนื่องจากเกิดการผลักกันกับอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุที่เป็นเป้าและหลังจากนั้นก็จะเข้าไปชนเป้าทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกทั้งการชะลอความเร็วและการชนจะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะของธาตุที่เป็นเป้า รังสีเอกซ์เหล่านี้ก็คือ รังสีเอกซ์ที่จะนำไปใช้ในการกระตุ้นสารตัวอย่างต่อไปนั่นเอง



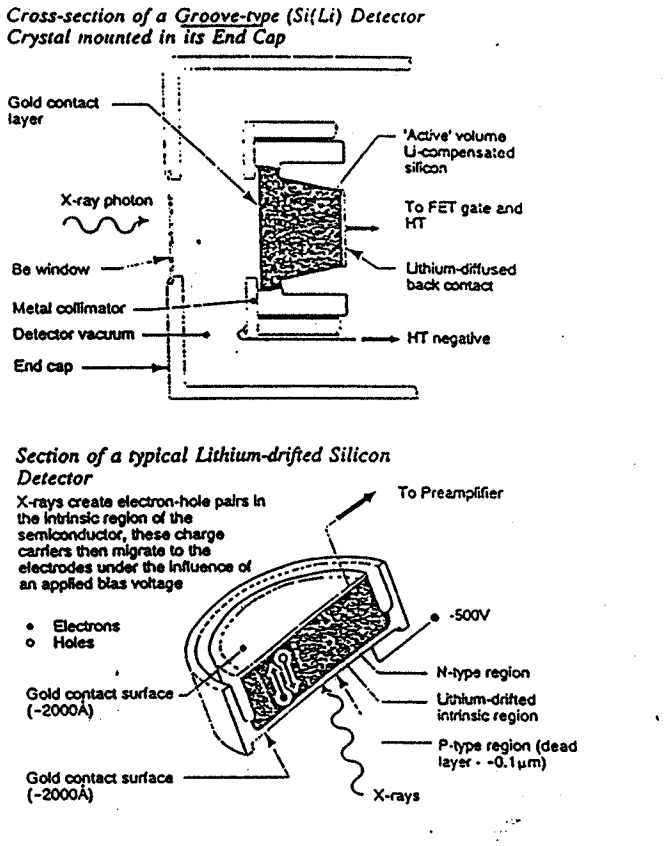
ภาพที่ 7 แสดงหลอดรังสีเอกซ์ (สัมพันธ์ วงศ์นาวา, 2541)

หัววัด (Detector)

หัววัดแบบกึ่งตัวนำ

วัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะที่นำมาใช้ทำหัววัดแบบนี้คือ ผลึกซิลิคอน (Si) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 8 ซึ่งเป็นธาตุหมู่ที่ IV หัววัดที่ใช้กับเครื่อง EDXRF นี้จะเคลือบด้วย Li และนำไปอบให้ความร้อน อิเล็กตรอนของธาตุ Li จะสามารถเคลื่อนที่ได้ในผลึกของSi และจะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา เพื่อยืดอายุการใช้งานของหัววัดทำได้โดยใช้ความเย็นยวดยิ่งจากไนโตรเจนเหลวทำให้หัววัดนี้จึงจำเป็นต้องมีส่วนหนึ่งแช่อยู่ในถังไนโตรเจนเหลวตลอดเวลาโผล่มาเฉพาะส่วนที่เป็นหัววัดรังสีเท่านั้นและภายในบริเวณหัววัดต้องเป็นสูญญากาศเพื่อลดการสูญเสียความเย็นแก่บรรยากาศ

หัววัด Si(Li) ที่ใช้ในเครื่อง EDXRF นั้นในการใช้งานจะต่อแบบไบอัสกลับภายใต้ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 600 โวลท์ ชั้นที่มี Li แทรกอยู่นั้นเป็นบริเวณที่ไวและมีบทบาทในการตรวจวัดรังสีที่ผ่านเข้ามา เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้ามาจะทำให้เกิด โฟโตอิเล็กตรอนเกิดเป็น electron – hole pair ภายในผลึก ในการนี้จะมีการดูดกลืนพลังงานจากรังสีเอกซ์ไปครั้งละ 3.8 eV ต่อการทำให้เกิน electron – hole pair 1 คู่ ส่วนพลังงานที่เหลือของรังสีเอกซ์ก็จะทำให้เกิด electron – hole pair ไปเรื่อย ๆ โดยแต่ละครั้งใช้พลังงานไป 3.8 eV จนกว่าพลังงานจะถูกใช้หมดเป็นการถ่ายทอดพลังงานเข้าสู่หัววัด ส่วน electron – hole pair ก็เปรียบเสมือนประจุ ลบ-บวก ซึ่งทำให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าจากผลึกหัววัดไปสู่ส่วนขยายสัญญาณต่อไป



ภาพที่ 8 แสดงหัววัด Si (Li) (Oxford Instument industrial group, 1993)

การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ของระบบ EDXRF

จากภาพที่ 6 ลำรังสีเอกซ์ที่เกิดจากหลอดรังสีเอกซ์จะถูกส่งไปยังสารตัวอย่างโดยผ่านแผ่นกรองซึ่งจะทำหน้าที่ตัดหรือลดรังสีของช่วงพลังงานอื่นเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนธาตุที่ต้องการวิเคราะห์และผ่าน ช่องรวมแสง ไปยังสารตัวอย่างทำให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุในสารตัวอย่างแล้วเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุขึ้นผ่าน ช่องรวมแสง เข้าสู่หัววัด Si(Li) เมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัดแล้วนั้นแต่ละหน่วยโฟตอนของรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้ามาจะทำให้เกิดไอโอไนเซชันและเกิดเป็นประจุเพื่อทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับพลังงานของโฟตอนนั้น ไอโอไนเซชันที่เกิดขึ้นภายในผลึก Si(Li) และทำให้เกิดประจุเป็นสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าสู่พรีแอมปริไฟเออร์ในพรีแอมปริไฟเออร์จะมีทรานซิสเตอร์แบบ FET (Field effect transistor) มีหน้าที่ปรับสัญญาณจากหัววัดให้เป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสี จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งต่อไปที่หน่อยประมวลผลพัลส์ (pulse processor) เพื่อขยาย (amplify) และปรับรูปร่าง (shapping) สัญญาณให้พอเหมาะเพื่อเปลี่ยนสัญญาณให้เป็นสัญญาณเชิงตัวเลขโดยวงจรที่เรียกว่า Analog –to-Digital Converter หรือ ADC ซึ่งจะถูกส่งไปยัง หน่วยความจำและแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์แบบกระจายพลังงานจะสะดวกและรวดเร็วมากเพราะระบบนี้จะวัดสัญญาณแบบหลายช่อง (multichanal analysis) ทำให้วัดสัญญาณได้คลอบคลุมช่วงกว้าง ๆ ได้ การตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่เข้าสู่หัววัดจะกระทำได้พร้อม ๆ กัน หลาย ๆระดับพลังงาน ครอบคลุมตลอดช่วงพลังงานที่ต้องการ แต่ก็มีข้อเสียที่ขีดจำกัดของการแยกพลังงาน ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการซ้อนทับกัน (overlaping) ของพีกที่มีพลังงานใกล้เคียงกัน

การวิเคราะห์คุณภาพโดยเครื่อง EDXRF ED 2000 จะทำให้ทราบธาตุองค์ประกอบโดยรวมของสารตัวอย่าง ซึ่งการทำงานของเครื่องมือ EDXRF ED 2000 นี้เครื่องจะทำการกำหนด dead time ที่ 45% โดยเครื่องจะปรับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้ dead time อยู่ที่ 45 % ดังนั้นการวิเคราะห์คุณภาพแม้จะเป็นตัวอย่างเดียวกันบางครั้งกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดจะไม่เท่ากัน และในการวิเคราะห์คุณภาพนี้จะสามารถทราบชนิดของธาตุได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากในเครื่องมือจะมีฐานข้อมูลสเปคตรัมของแต่ละธาตุโดยจะกำหนดไว้ที่พลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะของแต่ละธาตุจึงเป็นการสะดวกในการที่จะทราบว่ามี Scatter รบกวนธาตุที่ต้องการวิเคราะห์หรือไม่ถ้ามี สเปคตรัมของธาตุจะมีการคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งพลังงานเดิม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ปริมาณ

การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ในการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ นั้นทำได้โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุกับความเข้มข้นของรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้น ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นของธาตุใดธาตุหนึ่งนั้นจะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืน และการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของธาตุนั้นและธาตุที่เป็นส่วนประกอบที่อยู่ในตัวอย่างนั้น

การวิเคราะห์เชิงปริมาณในเทคนิคนี้มีด้วยกันหลายวิธี แต่ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกวิธีการสร้างกราฟปรับเทียบ (Calibration curve) ซึ่งจะใช้การปรับเทียบเครื่องมือโดยใช้สารมาตรฐานของดิน 8 ชนิดและทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองที่วัดได้กับปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ แต่ปัญหาสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์นี้คือผลที่เกิดจากเมทริกซ์ (metrix effect) ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างธาตุ (element interaction) กับ ผลทางกายภาพ (Physical effect) ซึ่งการแก้ไขปัญหาผลจากเมทริกซ์ทำได้โดยการเปลี่ยนเงื่อนไขในการวิเคราะห์และทำเตรียมตัวอย่างโดยบดสารตัวอย่างและสารมาตฐานให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน

สำหรับตัวอย่างฝุ่นละอองบนกระดาษกรอง เนื่องจากตัวอย่างฝุ่นบนกระดาษกรองมีลักษณะเป็น thin –film ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองของธาตุใดธาตุหนึ่งและจำนวนอะตอมของธาตุนั้นบน thin –film จะเป็นความสัมพันธ์ดังนี้

ถ้ากลุ่มอะตอมของธาตุที่สนใจที่อยู่รวมกันเป็นชั้นหนา dx เมื่อถูกกระตุ้นความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะที่เกิดขึ้น dI แสดงได้ดังนี้

$$dI = K.\csc\phi 1.I_0.\exp\{-(\mu_1.\csc\phi_1+\mu_2.\csc\phi_2.\rho.x)\}.dx \qquad (1)$$

โดย

K = ค่าคงที่ของการผกผัน

I_0 = รังสีกระตุ้น

ϕ_1 = มุมที่รังสี I_0 กระทำกับระนาบผิวสารตัวอย่าง

ϕ_2 = มุมที่รังสี I ทำกับระนาบผิวสารตัวอย่าง

μ_1 = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารตัวอย่างต่อ I_0

μ_2 = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารตัวอย่างต่อ I

ρ = ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง

x = ความหนาของสารตัวอย่าง

ถ้าสารตัวอย่างมีความบางมาก การดูดกลืนรังสี (ทั้ง I_0 และ I) โดยสารตัวอย่างจะเกิดน้อยมากถือได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นนิพจน์ที่เป็นเอ็กซ์โพเนนเชียลในสมการ (1) ก็จะมีค่าเท่ากับ 1 สมการ(1) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$dI = K.\csc\phi_1.I_0.dx$$

หรือ

$$\Delta I = K.\csc\phi_1.I_0\Delta x$$

ถ้า N เป็นจำนวนอะตอมที่สนใจที่มีอยู่ทั้งหมดในสารตัวอย่าง จำนวนอะตอมในแต่ละระดับความหนา (N) จะแปรผันโดยตรงกับระดับความหนา x

$$\Delta N \propto \Delta x$$

ดังนั้น

$$\Delta I = K.\csc\phi_1.I_0\,\Delta N \qquad (2)$$

สมการ (2) หมายความว่าถ้าสารตัวอย่างมีความหนาน้อยมาก ความเข้มของรังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนอะตอมของธาตุที่ต้องการศึกษาโดยไม่มีผลรบกวนจากปรากฏการณ์อื่นใด (สัมพันธ์ วงศ์นาวา, 2541)