



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิง
และวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

Impact Assessment of Product from Using Wastes as Alternative Fuels
and Raw Materials in Cement Processing

นามผู้วิจัย นางสาวเกศสุดา สุขกรม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์พัฒนา อนุรักษพงษ์พร, D.Tech.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร, Doc.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทน
ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

Impact Assessment of Product from Using Wastes as Alternative Fuels and Raw Materials
in Cement Processing

โดย

นางสาวเกศสุดา สุขกรม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2552

เกศสุดา สุขกรม 2552: การประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ของเสีย เป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์พัฒนา อนุรักษ์พงษ์พร, D.Tech.Sc. 89 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณของโลหะหนัก 8 ชนิด (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V และ Zn) ที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ปูนเม็ด และปูนซีเมนต์ โดยอาศัยเทคนิคการย่อยสลายด้วยกรด (acid digestion method) และตรวจวัดปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างที่ผ่านการย่อยสลายได้โดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICPs) พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักทุกประเภทที่พบในปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าในปูนเม็ด เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีการผสมหินและขี้ปั้งร่วมกับปูนเม็ด และจากการคำนวณสมดุลมวลพบว่า ปริมาณสูญหายของแคลเซียม ตะกั่ว และสังกะสี มีค่ามากกว่าร้อยละ 90 การทดสอบการชะของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์โดยวิธีทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (การกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว) พบว่า สารหนู โครเมียม และตะกั่วมีค่าเกินมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด แต่การทดสอบการชะด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) พบว่ามีเพียงสารหนูเท่านั้นที่มีค่าเกินมาตรฐานตาม US.EPA กำหนด และการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพในการเกิดมะเร็งต่อคนงานก่อสร้างพบว่า ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนร้อยละ 6.91 มีสารหนูปริมาณสูง ส่งผลให้ค่าความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งมีค่าเท่ากับ $1.13E-03$ ซึ่งสูงเกินกว่าค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ที่อยู่ในช่วง $1.00E-06$ ถึง $1.00E-04$ สามารถกล่าวได้ว่าในคนงาน 10000 คน เมื่อสัมผัสกับปูนซีเมนต์นี้จะมีโอกาสเป็นมะเร็ง 11 คน

Katesuda Sukkrom 2009: Impact Assessment of Product from Using Wastes as Alternative Fuels and Raw Materials in Cement Processing. Master of Science (Environmental Technology and Management), Major Field: Environmental Technology and Management, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Patana Anurakpongsatorn, D.Tech.Sc. 89 pages.

The amount of eight heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V and Zn) in raw material, clinker and cement were investigated using acid digestion method and analyzed by using Inductively Coupled Plasma Spectroscopy. The concentrations of all heavy metals were lower in cement than clinker due to the dilute effect brought by gypsum and limestone added in cement processing. The mass balance of heavy metals in cement processing was apparently indicated that the loss of Cd, Pb and Zn was higher than 90%. The leaching test of heavy metal from cement followed the Ministry of Industry method (sewage and unused material removal) shown that the concentrations of As, Cr and Pb were exceeded the limit specified by the Ministry of Industry. However, the leaching test from cement followed the Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) shown that only As was exceeded the limit specified by US.EPA. The sum of exposure cancer risk for worker by using 6.91 % alternative raw materials and fuels. As shown a high risk value. The cancer risk of As from cement was 1.13E-03, which was over the threshold value (1.00E-06 to 1.00E-04). For this is a significant risk, that is, 11 cancers per 10000 workers.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้โดยการอุปการะและช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พัฒนา อุนรัศย์พงศธร อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก และ อาจารย์ ดร. ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการค้นคว้าวิจัย และคำแนะนำด้านต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย ตลอดจนการตรวจ แก้ไขวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตฤวิทย์ สถาปนจารุ ประธานการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้ คำปรึกษา แก้ไขข้อบกพร่องจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ Professor Stephen Moore ณ University of New South Wales ประเทศ ออสเตรเลีย ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับนำมาใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณสุมาลี อมรเวชศิริกุล เจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนโครงการส่งเสริมการวิจัยร่วมแบบทวิภาคี (Bilateral Research Cooperation) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.) ภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรม รหัสโครงการเลขที่ MRG-OSMEP505S047 ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ และความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยเป็นกำลังใจให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จนทำให้ มีวันนี้ได้ และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ให้กำลังใจในการทำงานวิจัย เป็นอย่างดีตลอดมา

เกศสุดา สุขกรม

กันยายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	39
อุปกรณ์	39
วิธีการ	40
ผลและวิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	66
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน	75
ภาคผนวก ข การคำนวณหาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่าง	84
ภาคผนวก ค ปริมาณการได้รับสารพิษเข้าสู่ร่างกาย (intake)	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	89

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหลักแต่ละชนิด	13
2	องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลัก	13
3	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทดแทน	14
4	องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบทดแทน	16
5	การจัดกลุ่มของสารเคมีที่ทำให้เกิดมะเร็ง	32
6	ปริมาณของเสียที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทน	47
7	โลหะหนักในวัตถุดิบ เชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ (mg/kg)	49
8	โลหะหนักในของเสีย	50
9	สมมูลมวลของโลหะหนักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มี การใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนร้อยละ 6.91	54
10	สมมูลมวลของโลหะหนักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มี การใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนร้อยละ 2.31	55
11	การทดสอบการชะโลหะหนักจากปูนซีเมนต์	58
12	ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัส	60
13	ค่าความเป็นพิษของสารเคมี	61
14	ความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง	63
15	ความเสี่ยงต่อการไม่เกิดมะเร็ง	64
ตารางผนวกที่		
ข1	เปอร์เซ็นต์การได้กลับคืน (%recovery)	86
ค1	ปริมาณการได้รับสารพิษจากการสัมผัสปูนซีเมนต์ (mg/kg-d)	88

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แนวคิดปลดปล่อยมลพิษเป็นศูนย์	4
2	กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก	5
3	กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง	6
4	องค์ประกอบหลักของเครื่อง ICP-AES	24
5	ขั้นตอนการประเมินปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ	27
6	ขั้นตอนการประเมินความเป็นพิษ	30
7	ขั้นตอนการกำหนดลักษณะความเสี่ยง	34
8	ชุดกรองสูญญากาศ	41
9	เครื่อง Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)	41
10	เครื่องกวนเขย่าแบบหมุนสำหรับทดสอบการชะ	42
11	ขั้นตอนการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540	43
12	ก้อนหล่อแข็งปูนซีเมนต์	44
13	ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี TCLP	45
14	โลหะหนักในปูนเม็ดจากการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทน	51
15	ค่าความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง	
	(ก) กระบวนการที่มีการใช้ของเสียร้อยละ 6.91	
	(ข) กระบวนการที่มีการใช้ของเสียร้อยละ 2.31	65
16	ค่าความเสี่ยงต่อการไม่เกิดมะเร็ง	
	(ก) กระบวนการที่มีการใช้ของเสียร้อยละ 6.91	
	(ข) กระบวนการที่มีการใช้ของเสียร้อยละ 2.31	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณสารหนู	76
ก2	กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม	77
ก3	กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม	78
ก4	กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณทองแดง	79
ก5	กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิล	80
ก6	กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว	81
ก7	กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณวานาเดียม	82
ก8	กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสี	83

การประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงและ วัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

Impact Assessment of Product from Using Wastes as Alternative Fuels and Raw Materials in Cement Processing

คำนำ

การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ส่งผลให้ของเสียอุตสาหกรรมมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ทำให้มีความจำเป็นในการลดปริมาณและกำจัดของเสียอุตสาหกรรม เพื่อป้องกันมลพิษที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปแล้วการลดปริมาณของเสียอุตสาหกรรมมีหลายวิธี เช่น การตัดแปลงกระบวนการ การคัดแยกของเสีย และการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ กระบวนการนำของเสียอุตสาหกรรมกลับมาใช้อีกครั้ง ซึ่งนอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดแล้วยังสามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตอีกด้วย

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องใช้พลังงานเป็นอย่างมากในกระบวนการผลิต ทั้งในรูปของพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยพลังงานความร้อนได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล (fossil fuel) เป็นหลัก และเชื้อเพลิงฟอสซิลส่วนใหญ่เป็นการนำเข้าจากต่างประเทศ จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงในกระบวนการผลิต

ในปี พ.ศ. 2538 รัฐบาลได้มีการสนับสนุนให้มีการใช้เตาเผาปูนซีเมนต์ในการร่วมกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม (co-combustion) โดยบริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม (แก่งคอย) จำกัด (บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด, 2548) ได้ช่วยเพิ่มศักยภาพในการจัดการของเสียอุตสาหกรรมให้ภาครัฐ โดยเป็นบริษัทผู้ผลิตปูนซีเมนต์รายแรกของประเทศไทยที่ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานปรับปรุงคุณภาพของเสียรวม (ลำดับที่ 101) จากกระทรวงอุตสาหกรรมให้มีการนำของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปแล้วของเสียที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนี้มีทั้งของเสียที่เป็นของเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมประเภทชีวมวล (biomass) เช่น แกลบ เศษไม้ ขี้เลื่อย เป็นต้น และของเสียที่เป็นขยะจากอุตสาหกรรม อันประกอบด้วย น้ำมันที่ใช้แล้ว ยางรถยนต์ อุตสาหกรรมพลาสติก เศษไม้จากอุตสาหกรรมไม้ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามการนำของเสียอุตสาหกรรม

เหล่านี้ไปใช้ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ความเหมาะสมของชนิดของเสียอันตรายที่จะนำมาเข้าสู่เตาเผา ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิง เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการปนเปื้อนของเสียอุตสาหกรรมนั้นๆ ต่อสภาพแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มของมลพิษในอากาศหรือการปนเปื้อนต่อผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะการนำของเสียอันตรายที่มีโลหะหนักมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์นั้นๆ เมื่อผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการชะล้าง

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์รวมทั้งนำผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนไปประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้สัมผัส เนื่องจากโลหะหนักบางชนิดจัดเป็นสารประเภทที่ก่อให้เกิดมะเร็งหรือบางชนิดมีผลกระทบต่อสุขภาพแบบไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง ซึ่งควรมีการควบคุมให้ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนอยู่ในช่วงที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงน้อย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การศึกษาผลของของเสียอันตราย โดยเฉพาะผลของโลหะหนักที่มีในปูนซีเมนต์ ซึ่งจะต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและความปลอดภัยของผู้สัมผัสตลอดจนถึงคุณภาพสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังทดสอบการชะของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ โดยนำไปทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 (การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว) และวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกชะนั้นมีค่ามากกว่าที่มาตรฐานของพระราชบัญญัติกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้หรือไม่ ทั้งนี้เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้สัมผัสปูนซีเมนต์ (exposure assessment)

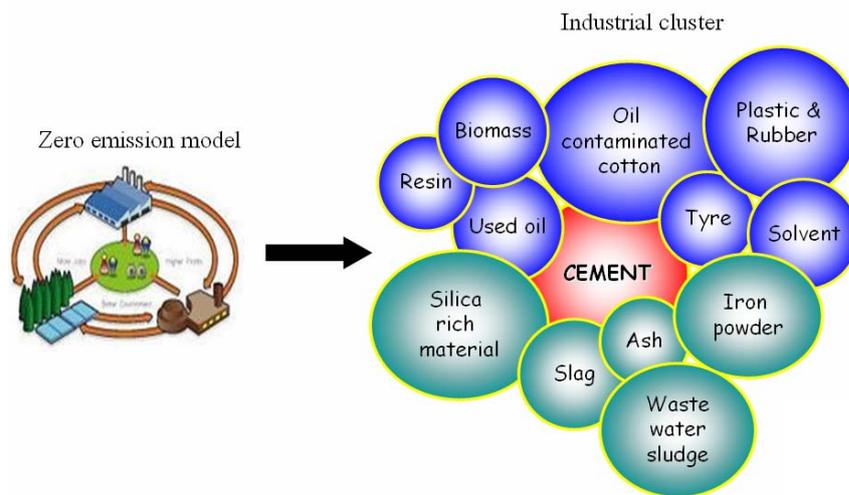
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในผลิตภัณฑ์จากการใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และคำนวณสมมูลมวลของโลหะหนัก
2. ทดสอบการชะของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ โดยการทดสอบด้วยวิธีมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 (การกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว) และวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)
3. ประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพคนงานที่ได้รับสัมผัสปูนซีเมนต์

การตรวจเอกสาร

1. แนวคิดลดปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ (zero emission concept)

หลักสำคัญของแนวคิดลดปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ คือ การจัดกลุ่มอุตสาหกรรม (industrial cluster) เพื่อหมุนเวียนกากอุตสาหกรรมจากอุตสาหกรรมหนึ่งนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในอีกอุตสาหกรรมหนึ่ง มีประสิทธิภาพและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์สามารถหมุนเวียนนำกากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบทดแทนได้หลายประเภท ดังนั้นอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์จึงเปรียบเสมือนเป็นศูนย์กลางของกลุ่มอุตสาหกรรมตามแนวคิดลดปล่อยมลพิษเป็นศูนย์



ภาพที่ 1 แนวคิดลดปล่อยมลพิษเป็นศูนย์

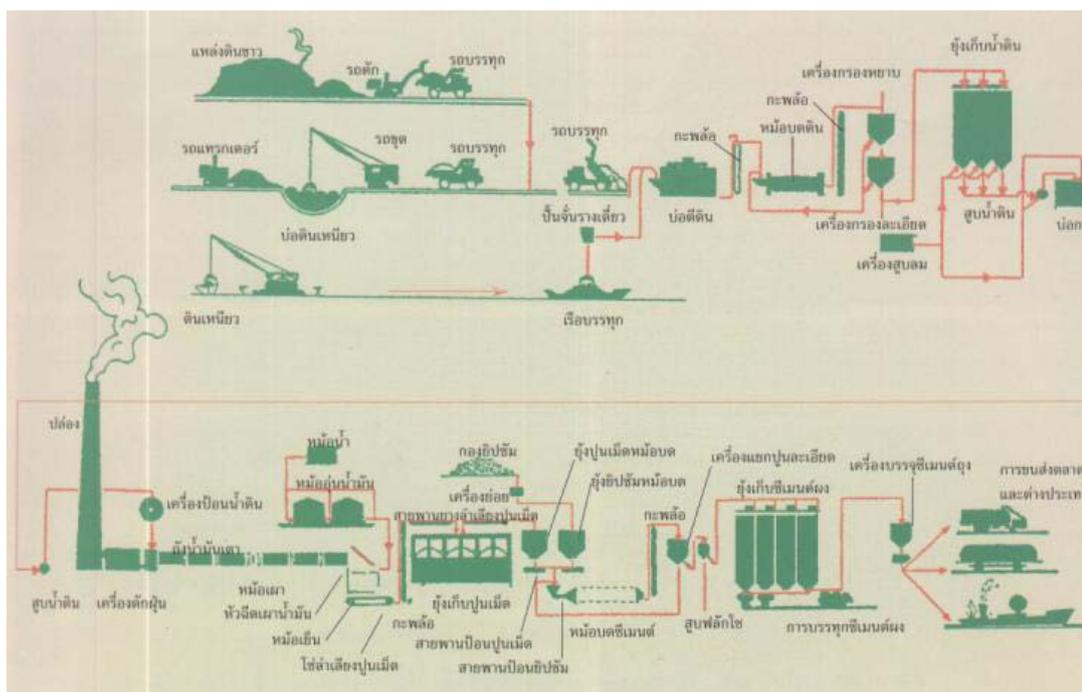
ที่มา: บริษัท เอส ซี ไอ อี โค้ เซอร์วิสเซส จำกัด (2550)

2. กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (cement processing)

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.1 กระบวนการผลิตแบบเปียก (wet process)

กระบวนการผลิตแบบเปียกแสดงดังภาพที่ 2 วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตคือ ดินขาว (marl) และดินเหนียว (clay) การผลิตเริ่มจากนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาผสมกับน้ำในบ่อ ตีดิน กวนให้เข้ากัน นำไปบดให้ละเอียดในหม้อบดดินจนได้น้ำดิน (slurry) แล้วกรองเอาเศษหิน



ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก

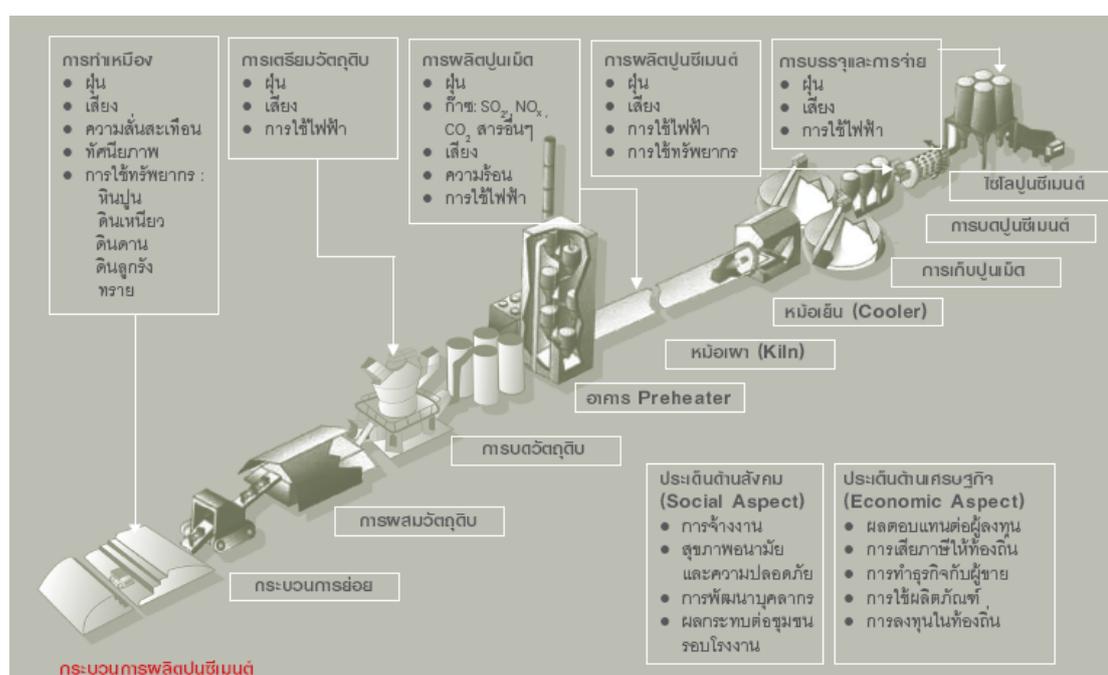
ที่มา: จักรราฐ (2550)

และส่วนที่ไม่ละลายน้ำออก จากนั้นนำไปเก็บไว้ในถังเก็บ (silo) เพื่อตรวจสอบคุณภาพและปรับแต่งส่วนผสมให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด น้ำดินที่มีส่วนผสมที่ถูกต้องแล้ว จะถูกนำไปรวมกันที่บ่อกวนดินเพื่อให้มีปริมาณเพียงพอ และกวนให้ส่วนผสมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้งหนึ่ง ก่อนที่จะนำไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (rotary kiln) ความร้อนในหม้อเผาจะทำให้น้ำระเหยออกสู่บรรยากาศ เหลือแต่เม็ดดิน ซึ่งเมื่อให้ความร้อนต่อไปจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็นปูนเม็ด (clinker) ขั้นตอนการบดปูนเม็ดให้กลายเป็นปูนซีเมนต์ ทำโดยนำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม (gypsum) แล้วบดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (cement mill) จากนั้นจะลำเลียง

ปูนซีเมนต์ไปเก็บไว้ในถังเก็บปูนซีเมนต์ผง (cement silo) เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป (จักรราฐ, 2550)

2.2 กระบวนการผลิตแบบแห้ง

กระบวนการผลิตแบบแห้งเป็นประเภทที่ใช้กันมากที่สุด (ภาพที่ 3) อุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานสูง โดยพลังงานที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 30-40 ของค่าใช้จ่ายในการผลิต (Genon and Brizio, 2008) ตั้งแต่ในอดีตที่ผ่านมา เชื้อเพลิงหลักที่ใช้คือ ลิกไนต์ ถ่านหิน พีโตรเลียมโค้ก (petroleum coke) และน้ำมันเตา วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ได้แก่ หินปูน ดินเหนียว ดินดาน ดินลูกรัง และทราย



ภาพที่ 3 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง

ที่มา: บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด (2548)

หินปูนซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูน แต่หินปูนที่ได้ยังมีขนาดใหญ่ จึงต้องนำมาลดขนาดโดยเครื่องย่อย (crusher) วัตถุดิบอื่นคือ ดินดาน (shale) และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (corrective materials) ก็ต้องผ่านเครื่องย่อยเพื่อ

ลดขนาดให้เหมาะสมเช่นเดียวกับวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (storage yard) จากนั้นก็จะลำเลียงไปยังหม้ออบคว้ตฤดฤดบ (raw mill) ต่อไป

หม้ออบคว้ตฤดฤดบมีหน้าที่บดหินปูน ดินคาน และคว้ตฤดฤดบปรับแต่งคุณสมบัติให้เป็นผงละเอียด ซึ่งเรียกว่า คว้ตฤดฤดบสำเร็จ (raw meal) หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ว จึงส่งคว้ตฤดฤดบสำเร็จไปยังยั้งผสมคว้ตฤดฤดบสำเร็จ (raw meal homogenizing silo) เพื่อเก็บและผสมคว้ตฤดฤดบสำเร็จให้เป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนส่งไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน กระบวนการเผาช่วงแรกเป็น ชุดเพิ่มความร้อน (preheater) จะค่อยๆ เพิ่มความร้อนให้แก่คว้ตฤดฤดบสำเร็จ แล้วส่งคว้ตฤดฤดบสำเร็จไปเผาในหม้อเผา ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ 1,200 – 1,400 องศาเซลเซียส จนในที่สุดกลายเป็นปูนเม็ด จากนั้นทำให้ปูนเม็ดเย็นลง ซึ่งปูนเม็ดนี้จะถูกบดและผสมด้วยยิปซั่ม เพื่อผลิตออกมาเป็นปูนซีเมนต์ (Karstensen, 2007) ปริมาณยิปซั่มที่ใช้ผสมประมาณร้อยละ 2.5 ถึง 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อหน่วงการก่อตัวอย่างรวดเร็วของปูนซีเมนต์ (สุรชาติพิย์, 2548)

ปูนซีเมนต์จะถูกส่งจากหม้อบดปูนไปยังไซโลปูนซีเมนต์ ในส่วนการบรรจุหรือส่วนการขนส่งปูนซีเมนต์จะถูกนำออกจากไซโลปูนซีเมนต์โดยเครื่องมือต่างๆ และส่งผ่านสายพานสู่สถานีส่งจ่ายในโรงงานหรือส่งตรงสู่รถขนส่ง

3. เชื้อเพลิง (Fuel)

คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

เมื่อเกิดการเผาไหม้ เชื้อเพลิงจะเป็นสสารที่ให้พลังงานความร้อนออกมา ธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในเชื้อเพลิงคือ ธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจน ธาตุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนี้ เมื่อถูกเผาไหม้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับก๊าซออกซิเจน ทำให้ได้พลังงานความร้อนและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และทำให้เกิดแก๊สไอเสียขึ้น เชื้อเพลิงที่นำมาใช้ประโยชน์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

3.1 เชื้อเพลิงแข็ง (solid fuel)

เชื้อเพลิงแข็ง หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของแข็งที่มีอุณหภูมิปกติธรรมดา

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชนิดนี้ ส่วนมากจะประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และเถ้า เมื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนในอากาศแล้ว จะให้พลังงานความร้อน เมื่อเกิดการเผาคาร์บอนจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนไฮโดรเจนเมื่อเกิดการเผาไหม้จะได้น้ำ แหล่งกำเนิดหรือชนิดของเชื้อเพลิงแข็ง แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

3.1.1 เชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่

3.1.1.1 ไม้ (wood) เป็นวัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงต่างๆ ไป เนื้อไม้ประกอบด้วย สารลิกนิน และเยื่อเซลลูโลส เป็นส่วนใหญ่ ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ หากเป็นไม้ที่มีปริมาณไขมันสูง จะให้เปลวไฟที่เข้มและสว่างมาก เช่น ไม้สน ถ้ามีปริมาณไขมันต่ำ เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะค่อนข้างจางและใส

3.1.1.2 ถ่านหิน (coal) เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่เกิดขึ้นจากการทับถมของซากพืช สิ่งมีชีวิต เป็นเวลาหลายล้านปี ทำให้สิ่งเหล่านี้เน่าเปื่อย ผุพัง และเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ธรณีวิทยา และชีววิทยา จนกระทั่งถูกแรงกดดันบีบอัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ แปรสภาพเป็นชั้นของถ่านหิน โดยมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และอาจมีธาตุอื่น เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ถ่านหินที่มีอายุมากจะมีลักษณะเนื้อแน่น สีดำ ถ้ามีปริมาณธาตุคาร์บอนมากก็จะให้ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงสูง ถ่านหินชนิดเดียวกัน แต่มีแหล่งกำเนิดต่างกันอาจมีความร้อนทางเชื้อเพลิงไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณส่วนประกอบของคาร์บอนและไฮโดรเจน และค่าความชื้น (moisture) ของถ่านหินนั้นๆ

นอกจากองค์ประกอบสำคัญที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ถ่านหินยังมี ส่วนประกอบของซิลิกอน อะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งธาตุเหล่านี้เมื่อเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน จะได้ออกไซด์ของโลหะต่างๆ ทำให้เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหิน ประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะเหล่านี้ด้วย ในระหว่างที่ถ่านหินมีการเปลี่ยนแปลงสภาพ ไฮโดรเจน และออกซิเจนจะลดลงตามลำดับ เนื่องจากเกิดการระเหิด (volatile matter) ซึ่งมีผลทำให้ความชื้นของธาตุทั้งสองถูกขับออกไป และจะทำให้อัตราส่วนของธาตุคาร์บอนของถ่านหินเพิ่มสูงขึ้นไปด้วยโดยขึ้นอยู่กับเวลา จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มีการแยกชั้นของถ่านหิน และมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถแบ่งถ่านหินตามคุณภาพได้ 4 ชนิด คือ

1. ถ่านพีท (peat) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด ลักษณะเป็นสีน้ำตาล มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ มีร่องรอยของเนื้อไม้ปรากฏอยู่ เมื่อนำไปเผาไหม้จะมีควันออกมาจำนวนมาก มีกลิ่นเหม็น และให้ค่าความร้อนต่ำ เนื่องจากถ่านพีทมีปริมาณคาร์บอนน้อย แต่มีความชื้นมาก

2. ถ่านลิกไนต์ (lignite) จัดเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ มีวิวัฒนาการมาจากถ่านพีท ซึ่งต้องใช้เวลาในการแปรสภาพถึงหลายร้อยล้านปี ยังมีร่องรอยของเนื้อไม้ปรากฏให้เห็นอยู่บ้าง ถ่านลิกไนต์ที่มีคุณภาพสูงจะเป็นสีดำ เรียกว่าลิกไนต์ดำ เมื่อนำไปเผาไหม้จะให้ความร้อนสูงกว่าและเกิดควันน้อยกว่าถ่านพีท ลักษณะของถ่านลิกไนต์ ส่วนใหญ่มีสีน้ำตาล น้ำตาลปนแดง หรือสีดำ มีความชื้นสูงมาก สามารถถูกไหม้ได้เองโดยง่ายเมื่อทิ้งไว้ในอากาศและมีปริมาณมากพอ แหล่งถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทยได้แก่ แหล่งแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แหล่งกระบี่ จังหวัดกระบี่ แหล่งลิ้ จังหวัดลำพูน และแหล่งแม่ตึบ จังหวัดลำปาง

3. ถ่านบิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูงกว่าถ่านลิกไนต์ นิยมใช้มากในต่างประเทศ ส่วนในประเทศไทยยังไม่มีการขุดพบแหล่งถ่านหินชนิดนี้ ถ่านบิทูมินัสจะให้ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงสูงกว่าถ่านลิกไนต์ ลักษณะเนื้อถ่านมีสีดำเป็นมันเงา ไม่มีร่องรอยของเนื้อไม้ แต่เปราะ หลังการเผาไหม้จะมีถ่านดำ เกิดควันน้อย เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านโค้ก

4. ถ่านแอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด มีปริมาณเนื้อถ่านมาก สีดำ เมื่อเผาไหม้เกิดควันน้อยมาก ให้ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงสูง มีความแข็งแรงมาก ติดไฟยาก แต่เมื่อติดไฟแล้วจะเผาไหม้เป็นเวลายาวนาน จึงทำให้ถ่านชนิดนี้มีราคาแพง

3.1.1.3 หินน้ำมัน คือหินที่อยู่ชั้นล่าง ประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภทเคโรเจน (kerogen) และสารอินทรีย์ประเภทแร่วอตซ์หรือหินเขียวหนุมาน แร่โดโลไมต์ ดินเหนียว แร่แคลไซต์ และแร่อื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวกสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง การนำหินน้ำมันมาใช้ประโยชน์จะต้องให้ความร้อนกับหินน้ำมัน ซึ่งที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส สารเคโรเจนจะสลายตัวและกลั่นตัวเป็นของเหลว และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแยกตัวออกจากหินน้ำมัน ซึ่งระดับอุณหภูมิที่มีการแยกตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันต่างๆ มีดังนี้ คือ อุณหภูมิ 62 – 225 องศาเซลเซียส จะได้แก๊สโซลีน อุณหภูมิ 225 – 305 องศาเซลเซียส จะได้น้ำมันดีเซล และอุณหภูมิ 305 – 375 องศาเซลเซียส จะได้น้ำมันเตา

3.1.2 เชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากขบวนการผลิต

3.1.2.1 ถ่านโค้ก เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นโดยนำเอาถ่านหินคุณภาพดี เช่น ถ่านบิทูมินัส มาเผาให้ความร้อนในภาชนะที่มีอากาศจำกัด โดยการให้ความร้อนติดต่อกันประมาณ 42 – 48 ชั่วโมง ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการคาร์บอนไนซ์ถ่านหิน ทำให้ได้ถ่านโค้กที่มีลักษณะพรุน สีดำ มีควันน้อยเมื่อเผาไหม้

3.1.2.2 เชื้อเพลิงอัดแท่ง (fuel briquette) เป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำเอาเศษถ่านหิน เศษไม้ จี้เถื่อย แกลบ กากอ้อย เปลือกถั่ว ขุยมะพร้าว และลิกไนต์ป่นมาอัดเป็นก้อนหรือเป็นแท่ง เพื่อสะดวกในการนำไปใช้งาน ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในวัสดุที่นำมาอัดเชื้อเพลิงนี้สามารถนำไปใช้ตามครัวเรือนหรือโรงงานที่ใช้เชื้อเพลิงแข็งได้

3.2 เชื้อเพลิงเหลว (liquid fuel)

เชื้อเพลิงเหลว หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ เชื้อเพลิงประเภทนี้ ได้แก่ น้ำมันที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม น้ำมันจากพืช และน้ำมันจากสัตว์ เป็นต้น เชื้อเพลิงเหลวนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และยานพาหนะ เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งานและให้ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงสูง เชื้อเพลิงเหลวที่นิยมใช้กันมาก ส่วนใหญ่จะได้อาจผลิตจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งมีดังนี้

3.2.1 น้ำมันเตา (fuel oil) เป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่ได้จากตอนล่างของหอกลั่นน้ำมัน ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่และไม่สามารถระเหยในหอกลั่นบรรยากาศ ถึงแม้ว่าน้ำมันเตาจะเป็นพวกกากน้ำมัน (residual fuel) ที่เหลือจากการกลั่นและมีสิ่งตกค้างต่างๆ ปนอยู่มากก็ตาม แต่ยังเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า การคมนาคมขนส่ง และใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์อีกด้วย

3.2.2 น้ำมันเบนซิน เป็นน้ำมันที่ได้จากการปรุงแต่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันโดยตรง และอาจได้จากการแยกแก๊สธรรมชาติเหลวหรือแก๊สโซลีนธรรมชาติ น้ำมันเบนซินจะผสมสารเพิ่มคุณภาพเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น สารเพิ่มค่าออกเทน สารเคมีสำหรับ

ป้องกันสนิม ป้องกันการกัดกร่อนในถังน้ำมัน และท่อท่อน้ำมัน เหมาะที่จะใช้กับยานพาหนะ เช่น รถยนต์ รถจักรยานยนต์

3.2.3 น้ำมันดีเซล เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ แต่จะมีช่วงจุดเดือดและความชื้นสูงกว่าน้ำมันเบนซิน เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่มีมูลฐานการทำงานแตกต่างจากเครื่องยนต์เบนซิน การจุดระเบิดของเครื่องยนต์ดีเซลใช้ความร้อนที่เกิดจากการอัดอากาศอย่างมากภายในกระบอกสูบ แล้วฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปเพื่อทำการเผาไหม้ ไม่ใช่เป็นการจุดระเบิดจากหัวเทียนเหมือนในเครื่องยนต์เบนซิน

3.2.4 น้ำมันก๊าด (kerosene) น้ำมันก๊าดเป็นเชื้อเพลิงที่ให้แสงสว่างตามครัวเรือน ในปัจจุบันมีการนำน้ำมันก๊าดมาใช้เพื่อให้แสงสว่างมีปริมาณลดลงตามความเติบโตของการใช้กระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามน้ำมันก๊าดยังมีบทบาทสำคัญในแง่ที่เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด มีกำมะถันต่ำซึ่งเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานกระเบื้อง อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

3.3 แก๊สเชื้อเพลิง (fuel gas)

เชื้อเพลิงแก๊ส หมายถึงเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิปกติธรรมดา หรือแก๊สทุกชนิดที่สามารถนำมาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดการเผาไหม้ ทำให้ได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เชื้อเพลิงประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และแก๊สแต่ละชนิดก็จะให้ความร้อนจากการเผาไหม้ไม่เท่ากัน เช่น แก๊สหุงต้ม แก๊สธรรมชาติ แก๊สชีวภาพ และแก๊สที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสิ่งอื่น เช่น แก๊สที่ได้จากการถลุงแร่เหล็ก เป็นต้น

3.3.1 แก๊สชีวมวล เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบ โดยการเผาถ่านหินหรือไม้ในเตาปฏิกรณ์แบบแพ็กเบด (packed bed) หรือเบดแบบเคลื่อนที่ (moving bed reactor) ที่มีปริมาณอากาศจำกัด ซึ่งปริมาณอากาศที่ใช้จะต้องมีอัตราส่วนที่พอเหมาะกับแก๊สที่จะผลิตแก๊สชีวมวล

3.3.2 แก๊สชีวภาพ (bio gas) คือแก๊สที่เกิดการหมักและการย่อยสลายของสารอินทรีย์ (organic substance) เช่น มูลสัตว์ประเภทต่างๆ ตลอดจนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและ

อุตสาหกรรม เช่น วัคซีนและเศษอาหาร ได้มีการพัฒนาวิธีการหมักโดยใช้เทคโนโลยีแบบธรรมชาติ ค่าลงทุนต่ำ เทคโนโลยีที่ใช้ก็คือ การผสมมูลสัตว์กับน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งเป็นการกำจัดมูลสัตว์วิธีหนึ่ง โดยไม่ก่อให้เกิดภาวะแวดล้อมเสีย ทั้งยังได้ปุ๋ยเป็นผลพลอยได้อีกต่อหนึ่งด้วย วัคซีน และเศษอาหารเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรงหรือโดยการผสมมูลสัตว์เข้าไป แต่ประสิทธิภาพและผลผลิตแก๊สจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณคุณภาพของวัตถุดิบและขนาด ความเหมาะสมของภาชนะที่จะใช้หมักด้วย แก๊สที่ได้จากการหมักมูลสัตว์คือ แก๊สมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เล็กน้อย

3.3.3 แก๊สธรรมชาติ (natural gas) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง โดยที่ ชาติคาร์บอนกับธาตุไฮโดรเจนจับตัวกันเป็นโมเลกุลเช่นเดียวกับน้ำมัน ชาติสองชนิดนี้จะรวมตัวกันในส่วนส่วนของอะตอมที่แตกต่างกัน และให้สารประกอบที่ต่างกันด้วย โดยเริ่มตั้งแต่แก๊สมีเทน ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอมและไฮโดรเจน 4 อะตอม ถ้ามีคาร์บอน 2 อะตอมกับไฮโดรเจน 6 อะตอม จะได้สารประกอบที่มีชื่อว่าอีเทน เป็นเช่นนี้เรื่อยๆ ไปจนกระทั่งระดับคาร์บอนเพิ่มเป็น 8 อะตอม และไฮโดรเจนเป็น 18 อะตอม สารประกอบที่ได้มีชื่อว่า ออกเทน

3.3.4 แก๊สน้ำมัน (oil gas) เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้น้ำมัน หรือแก๊สจากการเผา โดยมีอากาศและไอน้ำเป็นตัวสำคัญในการผลิต

3.3.5 แก๊สที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ คือแก๊สที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งก็คือ แก๊สหุงต้ม โดยมีส่วนประกอบเป็นแก๊สโพรเพนและแก๊สบิวเทน ผลิตโดยนำแก๊สธรรมชาติ มาผ่านกระบวนการแยกแก๊สในโรงแยกแก๊ส

3.4 เชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

เชื้อเพลิงหลายชนิดสามารถนำมาใช้ให้พลังงานความร้อนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ ขึ้นอยู่กับค่าความร้อนของเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 1 โดยเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในเตาเผาปูนซีเมนต์ ได้แก่ ลิกไนต์ (lignite) ถ่านหิน (coal) ปิโตรเลียมโค้ก (petroleum coke) และน้ำมันเตา (fuel oil)

ตารางที่ 1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงหลักแต่ละชนิด

เชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (kJ/kg)
ลิกไนต์	16,300
ถ่านหิน	27,430
ปิโตรเลียมโค้ก	32,480
น้ำมันเตา	40,500
ก๊าซธรรมชาติ	43,000

ที่มา: Pipilikaki *et al.* (2005)

4. วัตถุดิบหลัก (traditional raw materials)

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะต้องมีองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) (Kääntee, 2002) (ตารางที่ 2) โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ได้แก่ หินปูน (limestone) ดินเหนียว (clay) ทราย (sand) และแร่เหล็ก (iron ore)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลัก

ออกไซด์ (%)	วัตถุดิบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	หินปูน	ดินเหนียว	ทราย	สินแร่
CaO	52.46	7.27	-	2.50
SiO_2	3.76	67.29	99.20	25.00
Al_2O_3	1.10	8.97	-	9.00
Fe_2O_3	0.66	4.28	0.50	60.00

ที่มา: สุรชาติพิศ (2548)

5. เชื้อเพลิงทดแทน (alternative fuels)

กระบวนการผลิตปูนเม็ดโดยการเผาในเตาหมุน มีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการนำของเสียมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน สถานะดังกล่าว ได้แก่ อุณหภูมิสูง ออกซิเจนมากเพียงพอ มีพื้นที่สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนมากพอ การผสมของแก๊สและผลิตภัณฑ์ที่ดี และเวลาที่เพียงพอ (มากกว่า 2 วินาที) (Mokrzycki and Bochenczyk, 2003) เชื้อเพลิงทดแทนที่สามารถนำมาใช้ในเตาเผาปูนซีเมนต์ ได้แก่ ขากรถยนต์ น้ำมันใช้แล้ว (Conesa *et al.*, 2008) กากตะกอน (Loo, 2008) และชีวมวล (Genon and Brizio, 2008) ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ของประเทศแถบทวีปยุโรปมีการใช้ทดแทนเชื้อเพลิงเดิมถึงร้อยละ 17 (Loo, 2008) ซึ่งตารางที่ 3 แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทดแทนที่สามารถนำมาใช้ในเตาเผาปูนซีเมนต์ได้

Schuhmacher *et al.* (2009) ศึกษาการนำกากตะกอนมาเผาเพื่อให้พลังงานความร้อน เนื่องจากกากตะกอนเป็นของเสียที่มีปริมาณมากและเป็นปัญหาสำหรับการกำจัด แต่เนื่องด้วยมีค่าความร้อนมากกว่า 2500 kcal/kg จึงสามารถเชื้อเพลิงทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ได้

ตารางที่ 3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทดแทน

เชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (kJ/kg)
ขากรถยนต์	31,400
เศษยางธรรมชาติ	27,900
พลาสติก	22,100
กระดาษ	16,700
เศษไม้	10,900
กากตะกอน	10,600

ที่มา: Mokrzycki and Bochenczyk (2003)

6. วัตถุดิบทดแทน (alternative raw materials)

กากอุตสาหกรรมที่ไม่มีค่าความร้อนและมีองค์ประกอบหลักเหมือนกับวัตถุดิบทั่วไปในการผลิตปูนซีเมนต์ (CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3) สามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบหลักได้ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรมที่สามารถนำมาใช้ทดแทนได้แสดงดังตารางที่ 4 โดยข้อดีในการนำกากของเสียเพื่อทดแทนวัตถุดิบหลักได้แก่ การลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในการผลิตปูนซีเมนต์ เช่น หินปูน หินดินดาน หินเชลล์ ดินลูกรัง และลดพลังงานที่ใช้ในการระเหิดเหมืองหิน นอกจากนี้กากอุตสาหกรรมบางชนิดยังมีสภาพเป็น CaO ไม่ใช่ CaCO_3 ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานในการแตกตัวของ CaCO_3 มาเป็น CaO อีก ซึ่งถือว่าประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ไม่ก่อให้เกิด CO_2 ด้วย ดังแสดงในสมการ (1)



Puertas *et al.* (2008) ศึกษาการนำเซรามิกใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เนื่องจากประเทศสเปนมีการผลิตเซรามิกสูงกว่า 600 ล้านตารางเมตรต่อปี ในขณะที่เดียวกันก็ส่งผลให้เกิดของเสียที่เป็นประเภทของแข็ง (solid waste) เพิ่มปริมาณมากขึ้น แต่ด้วยองค์ประกอบทางเคมีและแร่ธาตุที่ประกอบในเซรามิกมีความเหมาะสมต่อการนำมาผสมกับวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ได้

Alp *et al.* (2008) ศึกษาการนำกากทองแดง (copper slag) ที่ผ่านการคัดแยกออกจากแร่ซัลไฟด์แล้ว (sulphide ore) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม โดยกากทองแดงมีองค์ประกอบหลักคือ FeO , Fe_2O_3 และ SiO_2 และมีปริมาณ Al_2O_3 , CaO และ MgO น้อย ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบทดแทน

ออกไซด์ (%)	วัตถุดิบ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)			
	เซรามิก	ได้จากเตาเผาขยะชุมชน	แก้ว	กากแร่
CaO	6.55	37.00	8.44	0.66
SiO ₂	63.8	24.00	71.71	30.60
Al ₂ O ₃	17.4	6.00	1.26	2.96
Fe ₂ O ₃	3.55	3.00	0.09	59.08

ที่มา: Alp *et al.* (2008); Puertas *et al.* (2008); Sikalidis *et al.* (2002) และ Sobolev *et al.* (2007)

7. โลหะหนัก

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป ซึ่งเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอม ตั้งแต่ 23-34 และ 40-52 รวมทั้งธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์และแอกติไนด์ มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทในสภาวะปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรมากกว่าโลหะหนักอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Hawley, 1973) โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้ ความเป็นพิษของโลหะหนักยังสามารถจะเพิ่มขึ้นตามลำดับของระบบห่วงโซ่อาหารได้ (Rupert and Jones, 1994)

7.1 สารหนู (arsenic; As)

สารหนูเป็นธาตุที่พบมากในธรรมชาติโดยทั่วไปบนพื้นผิวโลก สารหนูสามารถรวมตัวกับออกซิเจน คลอไรด์ และซัลเฟอร์ อยู่ในรูปสารประกอบสารหนูอินทรีย์ แต่สารหนูที่พบในสัตว์และพืชจะรวมตัวกับคาร์บอน และไฮโดรเจน อยู่ในรูปสารประกอบสารหนูอินทรีย์ สารหนู

ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติแต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ (Dolislager, 2006) สารหนูสามารถอยู่ในรูปพันธะ 3+ ได้ มีอยู่หลายชนิด เช่น สารหนูไตรออกไซด์ สารหนูไตรคลอไรด์ และโซเดียมอาร์เซไนต์ สารหนูที่อยู่ในรูปพันธะ 5+ เช่น สารหนูเพนตะออกไซด์ กรดสารหนู และแคลเซียมอาร์เซเนต สารหนูที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมอาจจะมาจากแหล่งกำเนิดต่างๆ กัน เช่น จากหิน การหลอมทอง เงิน ทองแดง สังกะสี การเผาไหม้เชื้อเพลิง และการใช้สารหนูทางการเกษตรในรูปของสารปราบวัชพืช และสารปราบศัตรูพืช สารหนูอาจจะถูกพัดพาไปในบรรยากาศได้ระยะทางไกล และหากหายใจเข้าสู่ปอดจะแทรกซึมเข้าไปในถุงลมชั้นลึกได้ สารหนูอาจจะสะสมในพืชที่ปลูกในพื้นดินที่ปนเปื้อนด้วยสารหนู นอกจากนี้ยังสามารถแทรกซึมเข้าสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจากการชะล้างของน้ำฝน บ่อน้ำที่มีหินปนเปื้อนจะทำให้ไนบ่อน้ำปนเปื้อนด้วยสารหนูได้ด้วย

สารหนูอาจจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ทางระบบทางเดินอาหารและทางปอด นอกจากนั้นยังถูกดูดซึมได้ทางผิวหนัง และเนื้อเยื่อต่างๆ ได้ สารหนูจะถูกแทรกซึมระหว่างเซลล์โดยกลไกต่างๆ ที่ใช้การขนส่งฟอสเฟต (phosphate transport) เหมือนกับโปรท สารหนูจะรวมตัวกับกลุ่มซัลไฮดริลและกลุ่มไธซัลไฟด์ ทำให้เป็นพิษต่อเอนไซม์ภายในเซลล์และระบบการหายใจ ส่งผลทำให้เกิดการแตกหักของโครโมโซม เมื่อเรียงตามลำดับความเป็นพิษ สารหนูอินทรีย์มีความเป็นพิษมากที่สุด รองลงมาคือสารหนูอนินทรีย์ และสารประกอบสารหนูจะมีความเป็นพิษน้อยที่สุด ค่าครึ่งชีวิตของสารหนูประมาณ 10 ชั่วโมง และจะขับออกจากร่างกายทางไต

รูปแบบที่มีความเป็นพิษมากที่สุด คือ รูปสารหนูไตรออกไซด์ (As_2O_3) และโซเดียมอาร์เซไนต์ ($NaAsO_2$) สารหนูจะสะสมได้คิงในตับ ไต หัวใจและปอด และยังสามารถสะสมได้ในกระดูก ฟัน ผม และเล็บ การป่วยเป็นพิษจากสารหนูแบบเฉียบพลัน จะทำให้เกิดอาการปวดท้อง แต่พบยาก ความเป็นพิษเรื้อรังจะทำให้มีอาการผิดปกติต่างๆ เช่น กล้ามเนื้ออ่อนแรง สีที่ผิวหนังเข้มขึ้น ปากบวม ระบบทางเดินอาหารถูกรบกวน ตับ ไต ถูกทำลาย ระบบประสาทส่วนปลายอักเสบ และอัมพาต เล็บอาจจะพัฒนากลายเป็นเส้นสีขาว สารหนูในรูปก๊าซจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีพิษมากจะทำให้เสียชีวิตเนื่องจากเม็ดเลือดแดงแตก

7.2 แคดเมียม (cadmium; Cd)

แคดเมียมเป็นโลหะอ่อนสีเงิน มีเลขออกซิเดชันเพียงค่าเดียว คือ +2 จะละลายได้ในกรดไนตริกและสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท สารประกอบของแคดเมียมมีหลายชนิด โดยทั่วไป

พบในรูปของ cadmium oxide, cadmium carbonate, cadmium chloride, cadmium sulfate และ cadmium sulfide เป็นต้น แคดเมียมมีผลต่อสุขภาพ ทำให้เกิดมะเร็งปอด การหายใจเอาฝุ่นและควันของแคดเมียมเข้าไปในปริมาณมาก จะส่งผลให้เกิดพิษอย่างฉับพลัน มีไข้และเจ็บหน้าอก หายใจลำบาก หากมีปริมาณมากในเส้นเลือดจะทำให้เสียชีวิตอย่างเฉียบพลันได้ แคดเมียมสามารถเข้าร่างกายทางระบบหายใจหรืออาจซึมผ่านเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนัง โดยตรง และดูดซึมผ่านทางระบบย่อยอาหาร เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะถูกขนส่งผ่านเลือดไปยังตับและไต ซึ่งจะทำอันตรายต่อระบบการกรองของไต ผลของแคดเมียมที่มีต่อสุขภาพสามารถพบได้ทั่วไป เช่น ท้องร่วง ปวดท้อง อาเจียนบ่อยๆ กระดูกหัก ระบบประสาทส่วนกลาง ระบบภูมิคุ้มกัน และ DNA ถูกทำลาย ส่งผลต่อการเกิดมะเร็ง

แหล่งที่พบแคดเมียมพบได้ในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้แก่

1. โรงงานถลุงแร่ พริกสังกะสีและตะกั่ว
2. แหล่งที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงและถ่านหิน
3. แหล่งที่มีการนำแร่ธาตุต่างๆ กลับมาใช้ใหม่
4. แหล่งที่มีการทิ้งขยะและของเสียที่เป็นพลาสติกประเภทโพลีไวนิล ซึ่งจะต้องใช้แคดเมียมเป็นสารเพิ่มความคงตัว
5. น้ำทิ้งจากโรงงานพลาสติก

7.3 โครเมียม (chromium; Cr)

โครเมียมเป็นโลหะที่แข็ง และเปราะง่าย มีสีขาวคล้ายเงิน ทนต่อการกัดกร่อน มีวาเลนซ์ 0, +2, +3 และที่พบมากที่สุด คือ +6 โครเมียมเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ โดยปนอยู่กับอากาศ และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โครเมียมในบรรยากาศอาจเกิดได้จากธรรมชาติ เช่น การพังทลายของดิน หิน และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ การปนเปื้อนของโครเมียมในบรรยากาศไม่ได้เกิดจากภาคอุตสาหกรรมเท่านั้น แต่การเผาไหม้ต่างๆ เช่น ไฟป่า ก็ทำให้มีการแพร่กระจายของโครเมียมได้เช่นกัน เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการออกซิไดซ์โครเมียม ให้เป็นโครเมียม (VI) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เมื่อลอยอยู่ในอากาศจะค่อนข้างเสถียร แต่เมื่อรวมกับสารอินทรีย์ต่างๆ จะกลายเป็นโครเมียม (III) ละสมในร่างกาย พิษ และสัตว์

ความเป็นพิษของสารประกอบโครเมียม (VI) มีความเป็นพิษสูงกว่าสารประกอบโครเมียม (III) ถึงร้อยเท่า การสูดดมฝุ่นที่มีโครเมียม (VI) เข้าไป จะมีผลทำให้ระบบทางเดินหายใจทำงานผิดปกติ หากได้รับการสัมผัสโครเมียมระยะเวลานาน ใต้อาจจะถูกทำลายได้

7.4 ทองแดง (copper; Cu)

ทองแดงเป็นธาตุโลหะสีแดง มีวาเลนซ์ +1 และ +2 นำไฟฟ้าได้ดี ทองแดงบริสุทธิ์มีความอ่อนปานกลาง ไม่พบในรูปอิสระแต่พบในรูปแร่และสารประกอบ (Hawley, 1977) ในธรรมชาติพบทองแดงในรูป chalcocite (Cu_2S), chalpyrite (CuFeS_2) หรือ ตะกอนในรูป cuprite (Cu_2O) รูปแบบของสารประกอบเคมีของทองแดงมีหลายรูปแบบทั้งอยู่ในรูปคลอไรด์ ซัลไฟด์ และไนเตรต ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ส่วนสารประกอบที่อยู่ในรูปคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ และซัลไฟด์จะไม่ละลายน้ำ (McNeely *et al.*, 1979)

ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์หลายชนิด เช่น tyrocinase, acitodase และยังเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการสร้างฮีโมโกลบิน ทองแดงเข้าสู่ร่างกายทางเดินอาหาร และหายใจ โดยดูดซึมบริเวณทางเดินอาหารร้อยละ 30 การดูดซึมส่วนใหญ่เกิดที่กระเพาะอาหารและสะสมไว้มากที่ตับ ไต สมอง หัวใจ รองลงมาคือ กล้ามเนื้อ กระดูก และม้าม โดยในคนปกติจะมีความเข้มข้นของทองแดงในเลือด 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเพศหญิงจะมีปริมาณทองแดงสูงกว่าในเพศชายโดยเฉพาะผู้ที่คุมกำเนิดหรืออยู่ระหว่างการตั้งครรภ์ อาจพบทองแดงในเลือดสูงถึง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเด็กทารกที่ขาดทองแดงจะทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ส่วนคนโตเต็มวัยอาการผิดปกติเนื่องจากขาดทองแดงมีน้อยมาก แต่หากได้รับทองแดงเกินความต้องการจะมีอาการอ่อนเพลีย เวียนศีรษะ ท้องร่วง น้ำหนักลด เบื่ออาหาร เกิดความผิดปกติของตับ ไต ม้าม กระดูก ระบบน้ำเหลือง ระบบสืบพันธุ์และการมองเห็น (Berman, 1980) ถ้ามีทองแดงสะสมในร่างกาย 25-30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะทำให้คลื่นคลั่ง และตับแข็งได้ ทองแดงในรูปคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ทำให้อาเจียนมีสีเขียว ความดันโลหิตต่ำ หมดสติ (Hammond and Beliles, 1980) แต่ถ้าได้รับทองแดงร่วมกับโลหะอื่นๆ เช่น สังกะสีและแคดเมียม จะทำให้ไตทำงานผิดปกติอย่างเห็นได้ชัด

7.5 นิกเกิล (nickel; Ni)

นิกเกิลเป็นโลหะแข็งเนื้อเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความว่องไวปานกลางต่อปฏิกิริยา เป็นสารพวกเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) ในธรรมชาติมักเกิดในรูปของซัลไฟด์ (NiS) มีวาเลนซ์ +2 เป็นส่วนใหญ่ ส่วนวาเลนซ์ +3, +4 และ +6 มีน้อย นิกเกิลเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ โดยปนอยู่กับอากาศและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม นิกเกิลในบรรยากาศเกิดได้ทั้งจากธรรมชาติ โดยการพังทลายของดิน หิน และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ การปนเปื้อนของนิกเกิลในบรรยากาศจากกิจกรรมต่างๆ เช่น การหลอม และถลุงแร่ การผลิตอัลลอยด์ เป็นการปนเปื้อนของนิกเกิลในน้ำเกิดได้จากการละลายของสารประกอบนิกเกิลที่อยู่ในบรรยากาศกับน้ำฝนที่ตกลงสู่แหล่งน้ำ รวมทั้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ปล่อยน้ำเสียที่มีนิกเกิลปนอยู่ออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

สารประกอบของนิกเกิลที่เป็นพิษต่อมนุษย์มากที่สุด อยู่ในรูปของนิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งจะอยู่ในฝุ่นนิกเกิล ทำให้เกิดอาการพิษเฉียบพลันเมื่อหายใจเข้าสู่ร่างกาย โดยทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ หน้ามืด คลื่นไส้ อาเจียน ระบายท้องตา แขนงหน้าอก ไอ คล้ายโรคปอดอักเสบจากเชื้อไวรัส รวมทั้งมีผลกระทบต่อการทำงานของไต ต่อมหมวกไต ม้าม และสมอง ซึ่งจะทำให้ผู้ป่วยถึงแก่ชีวิตในที่สุด

การปนเปื้อนในรูปของเกลือที่ละลายน้ำ ถ้าได้รับเข้าไปจะก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันต่อผิวหนังที่สัมผัส และก่อให้เกิดการระคายเคือง ถ้าอยู่ในรูปของฝุ่นละออง และสารประกอบนิกเกิลคาร์บอนิล [Ni(Co)] จะก่อให้เกิดมะเร็งได้

7.6 ตะกั่ว (lead; Pb)

ตะกั่วเป็นโลหะหนักสีเงิน (ขาวปนฟ้า) ทนต่อการสึกกร่อน และมีความอ่อนตัวสามารถทำเป็นรูปทรงต่างๆ ได้ง่าย มีวาเลนซ์ 0, +2, +4 แต่ส่วนมากจะอยู่ในสภาวะวาเลนซ์ +2 ซึ่งเสถียรมากที่สุดในสภาพตามธรรมชาติพบตะกั่วเจือปนอยู่ทั่วไป ทั้งในดิน หิน น้ำ อากาศ และพืช การเจือปนของตะกั่วเข้าสู่สถานะแวดล้อมจากแหล่งตามธรรมชาติมีความสำคัญในด้านมลภาวะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การปนเปื้อนจากแหล่งที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ในปัจจุบัน (Harrison and Laxen, 1981)

ตะกั่ว แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1. ตะกั่วอนินทรีย์ (inorganic lead) ได้แก่ lead acetate, lead sulfate และ lead oxide มักใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

2. ตะกั่วอินทรีย์ (organic lead) ได้แก่ tetramethyl lead (TML) และ tetraethyl lead

การดูดซึมทางผิวหนังจะเกิดเฉพาะในตะกั่วอินทรีย์เท่านั้น ส่วนตะกั่วอนินทรีย์ไม่สามารถดูดซึมทางผิวหนังได้ ผู้ที่มีโอกาสได้รับตะกั่วทางผิวหนังได้แก่ ผู้ปฏิบัติงานในปั้มน้ำมัน ช่างซ่อมเครื่องยนต์ที่มีการใช้น้ำมันมีการเติมสาร tetramethyl lead หรือ tetraethyl lead ที่ผสมในน้ำมันเบนซิน เมื่อผู้ปฏิบัติงานกลุ่มนั้นใช้น้ำมันเบนซินที่ปนเปื้อนด้วยสารตะกั่วล้างมือ สาร tetraethyl lead สามารถซึมผ่านผิวหนังและเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดของร่างกายได้ และตะกั่วสามารถสะสมอยู่ในร่างกายได้เป็นระยะเวลานาน

7.7 วานาเดียม (vanadium; V)

วานาเดียมเป็นโลหะชนิดหนึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยมักพบในถ่านหิน และน้ำมันดิบในรูปของสารประกอบวานาเดียมเป็นธาตุที่มีหลายชนิดประจุ ได้แก่ +2, +3, +4 และ +5 ในธรรมชาติวานาเดียมมักปะปนมากับแร่ธาตุต่างๆ และเป็นส่วนประกอบหนึ่งของสิ่งมีชีวิต ซึ่งวานาเดียมที่พบนี้จะอยู่ในรูปของเตตระวาเลนซ์วานาเดตและเพนตะวาเลนซ์วานาเดต

วานาเดียมสามารถเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้หลายทาง อาทิเช่น การหายใจและการรับประทานอาหารในกลุ่มของน้ำมันจากเมล็ดทานตะวัน น้ำมันถั่วเหลือง แอปเปิล และไข่ การรับวานาเดียมเข้าสู่ร่างกายส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อร่างกายได้ซึ่งอาจจะเป็นลักษณะความเป็นพิษฉับพลันและสะสมวานาเดียมอาจทำให้เกิดการระคายเคืองในปอด หลอดลม ทางเดินหายใจ และอาจทำให้เกิดโรคทางเดินหายใจและปอดบวมได้ วานาเดียมยังทำให้เกิดการขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ ทำให้เกิดผลลบต่อระบบประสาท และทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบการทำงานของตับและไตอีกด้วย

7.8 สังกะสี (zinc; Zn)

สังกะสีเป็นธาตุโลหะที่แข็งแต่เปราะ มีสีขาวแกมเทา มีวาเลนซ์ +2 ไม่ละลายน้ำ ละลายได้ในกรดเจือจาง เช่น กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง ปกติไม่พบโลหะสังกะสีในรูปอิสระ ในธรรมชาติพบในแร่หรือสารประกอบสามารถรวมตัวกับสารอินทรีย์ ดังนั้นบริเวณที่มีสารอินทรีย์จะพบสังกะสีอยู่ด้วย (Hawley, 1977)

สังกะสีมีอยู่ในเปลือกโลกประมาณร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก ในรูปสังกะสี เช่น sphalerite (ZnS) หรือ blende ซึ่งเป็นแร่หลักที่ให้สังกะสี smithsonite (ZnCO₃) หรือ calamine และ willemite (ZnSiO₄) สังกะสีแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมโดยกระบวนการทางธรรมชาติ และการกระทำของมนุษย์ ด้วยคุณสมบัติของสังกะสีที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี จึงมีการนำมาใช้ในการเคลือบผิวโลหะชนิดอื่นที่มีความแข็งแรงแต่เกิดสนิมง่ายให้มีความคงทนมากขึ้น นอกจากนี้ยังนำสังกะสีมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การถลุงแร่สังกะสี การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช อุตสาหกรรมยา สี เครื่องพิมพ์ ผ้า กระดาษ นอกจากนี้ยังใช้สารประกอบของสังกะสีในการเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเชื้อเพลิงแทนตะกั่ว (Reilly, 1980)

สังกะสีในรูปสารประกอบเป็นพิษมากกว่าในรูปธาตุ หรือไอออนอิสระ ความเป็นพิษของสังกะสีไม่สามารถทำให้ลดลงด้วยหมู่ซัลไฮดริล (-SH) เหมือนในโลหะหนักชนิดอื่น สังกะสีเมื่อเข้าไปในร่างกายจะสะสมอยู่ที่ตับและไตมาก (Robert, 1989) สังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย แต่ต้องการในปริมาณน้อยมาก ในพลาสมาของคนปกติจะมีระดับความเข้มข้นของสังกะสีอยู่ประมาณ 85-100 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (Davies, 1980) สังกะสีมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโต และการพัฒนาของกระดูก พิษของโลหะสังกะสีเกิดจากการที่มีโลหะอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น แคดเมียม ตะกั่ว (Hegstrom and Stephen, 1989) สังกะสีสามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการปนเปื้อนในอาหารที่รับประทานและการหายใจ หากได้รับสังกะสีเกินความต้องการจะมีอาการผิดปกติ เช่น ปวดท้อง อาเจียน คลื่นไส้ ช็อค หากผู้ได้รับมีความต้านทานโรคต่ำกว่าปกติ และขาดแคลนวิตามินซี อาจถึงตายได้ (Berman, 1980) ปริมาณสังกะสีในร่างกายมีผลต่อการดูดซึมของแคดเมียมด้วย (Lee, 1983) หากใช้สังกะสีทำภาชนะบรรจุอาหารที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะทำให้สังกะสีละลายออกมาปนเปื้อนกับอาหารได้ ความเป็นพิษของสังกะสียังเกิดจากขนาดของอนุภาค ถ้ามีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จะสามารถขัดขวางทางเดินอาหาร ถ้าร่างกายได้รับสังกะสีในปริมาณ 10-15 มิลลิกรัมต่อวัน จะขัดขวางปฏิกิริยาบางอย่างในเซลล์ได้ สังกะสีถูกขับออกจากร่างกายได้ทางลำไส้ใหญ่ และทาง

ปีสภาวะประมาณ 110-600 ไมโครกรัมต่อลิตร หากตรวจพบปริมาณสังกะสีในปีสภาวะสูงถึง 800 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงว่าเกิดความผิดปกติของร่างกายขึ้น ซึ่งจะเป็นอาการของโรคไตอักเสบ และโรคตับแข็ง (Berman, 1980; Reilly, 1980)

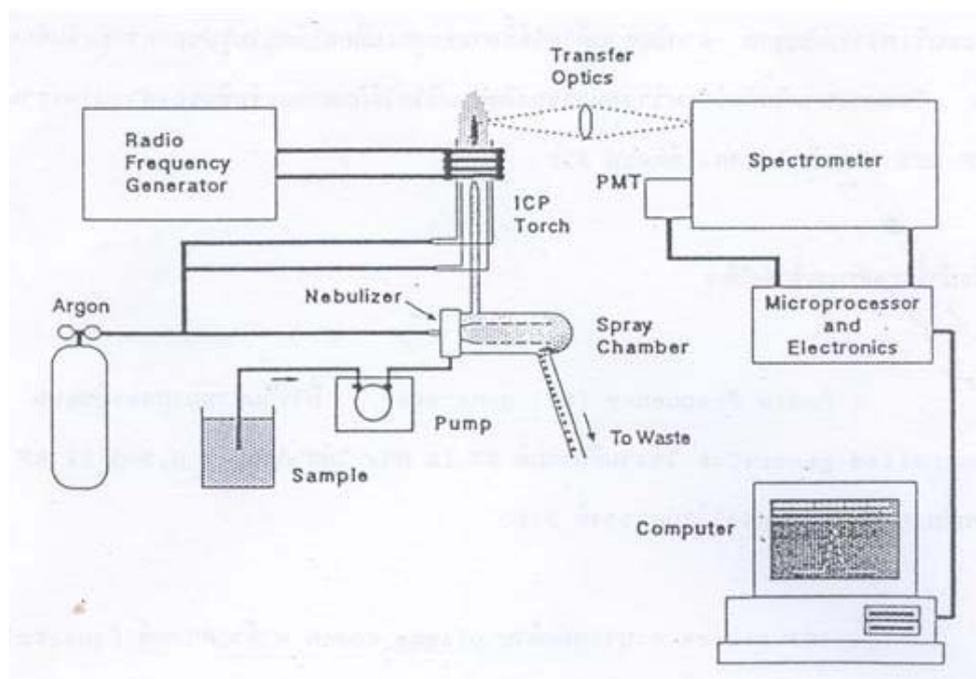
8. inductively coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP-AES)

เครื่องมือวิเคราะห์โลหะหนักโดยปกตินิยมใช้ atomic adsorption spectrometer (AAS) แต่สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ inductively coupled plasma atomic emission spectrometer

inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ มีช่วงการวิเคราะห์หาปริมาณทั้งที่มีระดับปริมาณมากจนถึงระดับปริมาณน้อยๆ โดยอาศัยหลักการของ atomic spectroscopy ในทางทฤษฎีแล้วเทคนิคนี้สามารถประยุกต์ให้หาธาตุเกือบทั้งหมด ยกเว้นธาตุอาร์กอน เทคนิค ICP-AES มีความสามารถในการวิเคราะห์แบบ multielement และสามารถวิเคราะห์หาความเข้มข้นของธาตุในช่วงกว้าง ๆ ได้ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญที่ทำให้เทคนิคนี้แตกต่างจากเทคนิค atomic absorption spectroscopy (AAS) โดยทั่วไปแล้วเทคนิค flame emission มักจะพบปัญหาเรื่อง matrix interference และ self absorption ทำให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุและความเข้มของแสงที่ธาตุนั้นๆ แปลงออกมาไม่ค่อยมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นตรง หรือมีในช่วงแคบๆ และในช่วงความเข้มข้นต่ำๆ แต่สำหรับเทคนิค ICP-AES นั้นเนื่องจาก plasma เป็นแหล่งให้พลังงานที่มีอุณหภูมิสูง (6000 – 10000 เคลวิน) และอยู่ในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย (inert gas, Ar gas) ทำให้ปัญหาเกี่ยวกับ chemical และ matrix interference เกิดขึ้นน้อยมาก

ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วย ICP-AES จะต้องทำให้เป็นสารละลาย ภายในเครื่องมือจะมีระบบที่ทำหน้าที่เปลี่ยนของเหลวให้เป็นละออง (aerosol) โดยผ่านขบวนการที่เรียกว่า nebulization ต่อจากนั้นละอองของตัวอย่างก็จะถูกนำไปสู่ plasma discharge เมื่อตัวอย่างเข้าสู่ plasma จะเกิดขบวนการต่างๆ ได้แก่ desolvation, vaporization, atomization, excitation และ/หรือ ionization อะตอมหรือไอออนที่ระดับพลังงานต่ำสุด (ground state) จะถูกกระตุ้นโดยรับพลังงานจาก plasma ทำให้อะตอมหรือไอออนเหล่านั้นมีระดับพลังงานสูงขึ้น (excited state) เมื่อกลับลงสู่ระดับพลังงานต่ำสุด ก็จะปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของแสง ซึ่งมีความยาวคลื่นเฉพาะตัว (characteristic radiation) แสงที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ระบบแยกความยาวคลื่นของ

แสงที่เรียกว่า spectrometer แสงที่ถูกแยกความยาวคลื่นแล้วจะถูกตรวจวัดโดยหัววัด (detector) หัววัดจะทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งเข้าสู่ระบบวิเคราะห์สัญญาณ จากสัญญาณที่วัดได้นี้อาจจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความเข้มข้นของธาตุนั้นๆ ได้ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณที่วัดได้กับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน เครื่อง ICP-AES โดยทั่วไป แสดงดังภาพที่ 4 (อุทัย, 2534)



ภาพที่ 4 องค์ประกอบหลักของเครื่อง ICP-AES

ที่มา: อุทัย (2534)

8.1 ข้อดีของ ICP-AES

1. ตามทฤษฎีสามารถตรวจวัดธาตุได้มากถึง 70 ชนิด ได้ภายในการวิเคราะห์เพียงครั้งเดียว
2. เครื่องมือทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ทำให้สามารถปรับปรุงความแม่นยำ ความถูกต้อง และทำงานได้มากในเวลาอันรวดเร็ว
3. ให้ผลผลิตสูงและใช้ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ที่คุ้มค่างกับผลที่ได้รับ

4. สามารถส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบ laboratory information management system ได้ทันที โดยที่ไม่ต้องกังวลถึงความผิดพลาดระหว่างการใส่ข้อมูลใหม่ด้วยตัวเอง (manual)

5. ICP-AES มีช่วงการทำงานที่กว้าง ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายชนิด

8.2 ข้อจำกัดของ ICP-AES

1. เครื่องมือมีความซับซ้อนทำให้ต้องการผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมเครื่องมือ
2. ช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมแต่ละธาตุมีความใกล้เคียงกันมาก และมีความซับซ้อน จึงอาจเกิดสัญญาณรบกวนในการตรวจวัดได้
3. ตัวอย่างที่จะใช้กับ ICP-AES จะต้องผ่านการย่อยและทำให้เป็นสารละลายก่อน จึงจะนำมาวิเคราะห์ได้

8.3 การใช้ประโยชน์ของ ICP-AES

ICP มีประโยชน์อย่างมากในงานวิเคราะห์ทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยมักจะใช้ inductively coupled plasma-mass spectroscopy (ICP-MS) หรือ liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectroscopy (LC-ICP-MS) ในการวิเคราะห์ โดยเฉพาะในการจำแนกและวิเคราะห์ชนิดของธาตุต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมธรรมชาติ เช่น ดิน น้ำ หิน แร่ หรือพืช แม้ว่าตัวอย่างเหล่านี้จะมีองค์ประกอบของธาตุในปริมาณที่แตกต่างกัน แต่ก็สามารถตรวจวิเคราะห์ด้วย ICP ได้ เพราะ ICP มี detection limit ต่ำและมีความไวสูง สามารถตรวจสอบผลที่เกิดจากรบกวนของอะตอมได้ในระดับต่ำ และสามารถระบุความเข้มข้นของธาตุได้ในระดับถึง ppb หรือ ppt นอกจากนี้ ICP ยังไม่ได้วิเคราะห์ได้เฉพาะธาตุคนละชนิดกันเท่านั้น แต่ยังสามารถวิเคราะห์ธาตุชนิดเดียวกันที่มีไอโซโทปต่างกันก็ได้ (เอกฉนัย, 2549)

9. การประเมินความเสี่ยง (risk assessment)

การประเมินความเสี่ยง คือ กระบวนการค้นหาความเป็นไปได้ทั้งหมดที่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของคนที่ได้รับอันตรายจากสิ่งแวดล้อม (U.S Environmental Protection Agency, 1989) การประเมินความเสี่ยงสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

- 9.1 การชี้บ่งอันตราย (hazard identification)
- 9.2 การประเมินความเสี่ยง (risk assessment)
 - 9.2.1 การประเมินปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ (exposure assessment)
 - 9.2.2 การประเมินความเป็นพิษ (toxicity assessment)
 - 9.2.3 ลักษณะความเสี่ยง (risk characteristic)
- 9.3 การจัดการความเสี่ยง (risk management)

การประเมินความเสี่ยงในแต่ละขั้นตอนสามารถดำเนินการได้ดังนี้

9.1 การชี้บ่งอันตราย (hazard identification)

การชี้บ่งอันตราย คือ กระบวนการพิจารณาอันตรายทั้งหมดที่มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพคน เป็นขั้นตอนแรกของการประเมินความเสี่ยง ข้อมูลการบ่งชี้อันตรายของผู้สัมผัสปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างคือ ข้อมูลผลการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์

9.2 การประเมินความเสี่ยง (risk assessment)

9.2.1 การประเมินปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ (exposure assessment)

การประเมินปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ คือ การประมาณทั้งเชิงปริมาณและความเข้มข้นของสารเคมีที่ได้รับ ระบุความถี่ในการสัมผัส ช่วงเวลาและช่องทางที่สัมผัสสารเคมี ขั้นตอนการประเมินปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับมี 3 ขั้นตอน แสดงดังภาพที่ 4

9.2.1.1 ขั้นตอนที่ 1 ลักษณะของการได้รับสารเคมี

การกำหนดลักษณะของการได้รับสารเคมี ได้แก่ ลักษณะทั่วไปทางกายภาพและลักษณะของผู้สัมผัส สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก) ลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ลักษณะอากาศ ลม เป็นต้น

ข) ลักษณะของผู้สัมผัส ได้แก่ คนงานต้องสัมผัสปูนซีเมนต์ในขณะที่ปฏิบัติงานก่อสร้าง

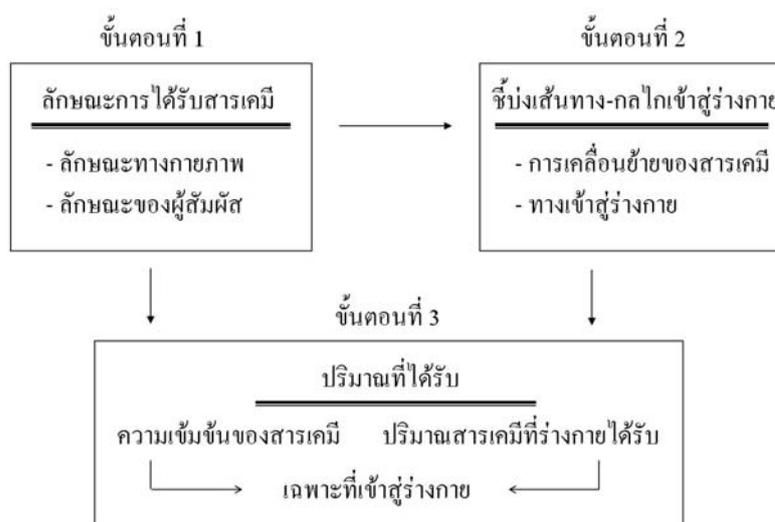
9.2.1.2 ขั้นตอนที่ 2 ชีบ่งเส้นทางและกลไกที่เข้าสู่ร่างกาย

การชีบ่งเส้นทางและกลไกที่เข้าสู่ร่างกาย เป็นการพิจารณาการเดินทางของสารเคมีจากแหล่งกำเนิดมาถึงคนที่ได้รับสารเคมี แบ่งได้ดังนี้

- ก) การเคลื่อนย้ายของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม
- ข) พิจารณาทางเข้าสู่ร่างกาย คือ การสัมผัสผิวหนัง

9.2.1.3 ขั้นตอนที่ 3 ปริมาณที่ได้รับ

หาความเข้มข้นของสารเคมีที่ปนเปื้อนมากับปูนซีเมนต์และปริมาณที่ร่างกายได้รับ โดยหาความเข้มข้นจากผลการตรวจวัดและคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับในรูปมวลของสารเคมีที่สัมผัสร่างกายต่อหน่วยน้ำหนักร่างกายต่อหน่วยเวลา งานวิจัยนี้ศึกษาความเสี่ยงจากการสัมผัสปูนซีเมนต์และได้รับสารเคมีขณะปฏิบัติงานก่อสร้าง ซึ่งคนงานสามารถได้รับสารเคมีที่ปนเปื้อนได้จากการสัมผัสทางผิวหนัง



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการประเมินปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ

ที่มา: ดัดแปลงจาก U.S Environmental Protection Agency (1989)

เราสามารถหาปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ (intake, I หน่วยมวลต่อน้ำหนักร่างกายต่อเวลา) ได้หลายทาง แต่ในที่นี้จะพิจารณาจากการได้รับสารเคมีผ่านทางเข้า 2 ทาง ได้แก่ ทางผิวหนัง และ ทางการหายใจ

ก) ทางที่ 1: การหายใจ (inhalation)

การได้รับสารพิษจากการหายใจขณะทำงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) (Louvar และ Louvar, 1998)

$$I_{inhalation} = \frac{C_1 R_{IH} t_E f_E D_t}{BW t_{avg}} \quad (2)$$

โดยที่	$I_{inhalation}$	= ปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับจากการหายใจ (mg/kg-day)
	C_1	= ความเข้มข้นของสารเคมี (mg/m ³)
	R_{IH}	= ความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศ (m ³ /hr)
	t_E	= อัตราการหายใจ (hr/day)
	f_E	= แฟกเตอร์การดูดซึมของปอด (unitless)
	D_t	= จำนวนชั่วโมงที่สัมผัสใน 1 วัน (0-24 hr)
	BW	= น้ำหนักร่างกาย (kg)
	t_{avg}	= ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่สัมผัส (day)

ข) ทางที่ 2: การกลืนกิน (ingestion)

การได้รับสารพิษจากการกลืนกินขณะทำงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) (Louvar และ Louvar, 1998)

$$I_{ingestion} = \frac{C_2 R_{IG} K_M f_I f_E D_t}{BW t_{avg}} \quad (3)$$

โดยที่	$I_{ingestion}$	=	ปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับจากการสัมผัส (mg/(kg-day))
	C_2	=	ความเข้มข้นของสารเคมีในปูนซีเมนต์ (mg/kg)
	R_{IG}	=	อัตราการกลืนกิน (mg/day)
	K_M	=	แฟกเตอร์ที่ใช้แปลงค่าปริมาตร (10^{-6} kg/mg)
	f_t	=	แฟรคชันของการกลืนกิน (unitless)
	f_E	=	ความถี่ในการสัมผัส (day/yr)
	D_t	=	ช่วงระยะเวลาในการสัมผัส (yr)
	BW	=	น้ำหนักร่างกาย (kg)
	t_{avg}	=	ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่สัมผัส (day)

ก) ทางที่ 3: การสัมผัสทางผิวหนัง (dermal adsorption)

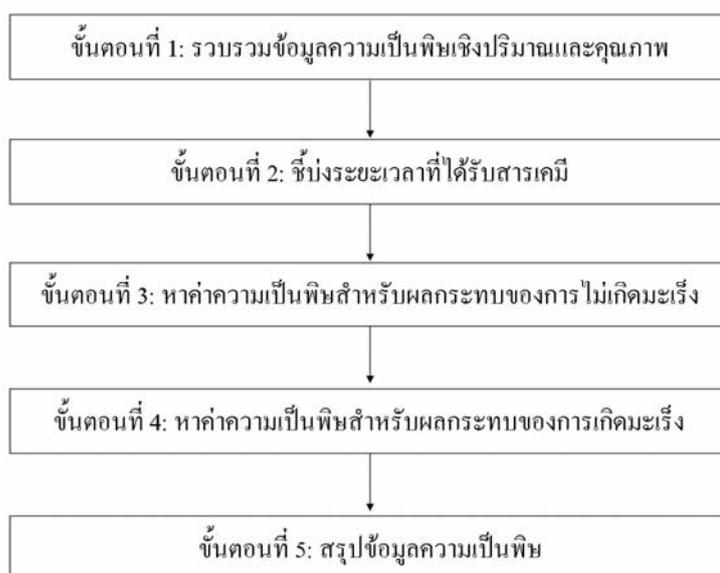
การได้รับสารพิษจากการสัมผัสทางผิวหนังขณะทำงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) (Louvar และ Louvar, 1998)

$$I_{dermal} = \frac{C_3 K_M A_S R_A ABS f_E D_t}{BW t_{avg}} \quad (4)$$

โดยที่	I_{dermal}	=	ปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับจากการสัมผัส (mg/(kg-day))
	C_3	=	ความเข้มข้นของสารเคมีในปูนซีเมนต์ (mg/L)
	K_M	=	แฟกเตอร์ที่ใช้แปลงค่าปริมาตร (10^{-6} kg/mg)
	A_S	=	พื้นที่ผิวหนังที่สัมผัส (cm ² /day)
	R_A	=	ค่าคงที่การซึมเข้าผิวหนัง (mg/cm ²)
	ABS	=	แฟกเตอร์ของการดูดซึม (unitless)
	f_E	=	ความถี่ในการสัมผัส (event/yr)
	D_t	=	ช่วงระยะเวลาในการสัมผัส (yr)
	BW	=	น้ำหนักร่างกาย (kg)
	t_{avg}	=	ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่สัมผัส (day)

9.2.2 การประเมินความเป็นพิษ (toxicity assessment)

การประเมินความเป็นพิษ คือ การให้น้ำหนักแนวโน้มของสารเคมีที่ปนเปื้อนที่จะเป็นสาเหตุทำให้คนที่สัมผัสมีสุขภาพแย่ลง เป็นการคาดการณ์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับกับโอกาสหรือความรุนแรงของการเกิดพิษ โดยทั่วไปมี 2 ขั้นตอน คือ การชั่งอันตราย ซึ่งเป็นกระบวนการตัดสินใจว่าสารเคมีที่คนได้รับแล้วจะทำให้คนมีสุขภาพแย่ลง เช่น เป็นมะเร็ง พิการ เป็นต้น และการประเมินหาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารเคมีที่ได้รับกับอาการสุขภาพที่แย่ลง อาจแสดงด้วยค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง (reference dose) หรือค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ทำให้เกิดมะเร็ง (slope factor) ซึ่งนำไปใช้คาดการณ์แนวโน้มที่ทำให้สุขภาพแย่ลง ขั้นตอนการประเมินพิษโดยทั่วไปมี 5 ขั้นตอน แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการประเมินความเป็นพิษ

ที่มา: ดัดแปลงจาก U.S Environmental Protection Agency (1989)

9.2.2.1 ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูลพิษเชิงปริมาณและคุณภาพ

ขั้นตอนการประเมินความเป็นพิษ ต้องมีการรวบรวมข้อมูลจากหลายแหล่งที่มีความเป็นไปได้ที่สารเคมีที่ปนเปื้อนจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น การเกิดมะเร็งและไม่เกิดมะเร็งในคน

9.2.2.2 ขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระยะเวลาได้รับสารเคมี

การประเมินกรณีสารพิษที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง มีการพิจารณาระยะเวลาที่ได้รับสารเคมีของค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง (reference dose) สามารถแบ่งได้เป็น

ก) แบบเรื้อรัง (chronic RfD) ใช้ประเมินผลกระทบของการไม่ก่อมะเร็งที่ระยะเวลาสัมผัส 7 ปีขึ้นไป

ข) แบบกึ่งเรื้อรัง (subchronic RfD) ใช้ประเมินผลกระทบของการไม่ก่อมะเร็งที่ระยะเวลาสัมผัส 2 สัปดาห์ ถึง 7 ปี

ค) แบบการสัมผัสแบบครั้งเดียว (single event) ใช้ประเมินผลกระทบของการไม่ก่อมะเร็งที่ระยะเวลาสัมผัส 1 สัปดาห์ ถึง 10 วัน

9.2.2.3 ขั้นตอนที่ 3 หาค่าความเป็นพิษสำหรับผลกระทบของการไม่ก่อมะเร็ง

ก) ค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง (reference dose) คือค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ใช้ในการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการได้รับสารเคมีประเภทไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง แต่จริงๆ แล้วค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็งนี้ต้องหาทั้งสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งและสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งด้วย เนื่องจากสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งโดยทั่วไปแล้ว ก็มีผลกระทบในส่วนที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็งด้วย ค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็งนี้ยังขึ้นกับทางที่สารเข้าสู่ร่างกาย และระยะเวลาที่ได้รับสารเคมี (แบบเรื้อรัง แบบกึ่งเรื้อรัง หรือแบบการสัมผัสแบบครั้งเดียว) ซึ่งได้มีการรวมค่าความไม่แน่นอนต่างๆ ไว้แล้ว ค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็งนี้ ห้ามจากค่าปริมาณสารเคมีต่ำสุดที่สัตว์ทดลองได้รับในระยะเวลาหนึ่งแล้ว ทำให้สัตว์ทดลองแสดงอาการเป็นพิษออกมาให้เห็น (lowest observed adverse

effect level, LOAEL) หรือค่าปริมาณสารเคมีสูงสุดที่สัตว์ทดลองได้รับระยะเวลาหนึ่งแล้ว ไม่สามารถทำให้สัตว์แสดงความเป็นพิษออกมาให้เห็น (no observed adverse effect level, NOAEL) ดังนั้นจึงเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความปลอดภัยของสารพิษนั้นต่อสัตว์ทดลอง ซึ่งนำมาหาค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง ได้จากสมการที่ (5)

$$RfD = NOAEL \text{ or } LOAEL / (UF_1 \times UF_2 \times \dots \times MF) \quad (5)$$

เมื่อ UF = ค่าความไม่แน่นอน (uncertainty factor)
 MF = ค่าปรับปรุง มีค่าระหว่าง 0 ถึง 10 (modifying factor)

9.2.2.4 ขั้นตอนที่ 4 หาค่าความเป็นพิษสำหรับผลกระทบของการก่อมะเร็ง

ค่าความเป็นพิษที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงของการเกิดมะเร็ง คือ ค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ทำให้เกิดมะเร็ง (slope factor) และค่าแนวโน้มที่ทำให้เกิดมะเร็ง (weight of evidence) ขั้นตอนแรกให้พิจารณาจัดกลุ่มของการเกิดมะเร็งตามค่าแนวโน้มของการเกิดมะเร็งตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การจัดกลุ่มของสารเคมีที่ทำให้เกิดมะเร็ง

กลุ่ม	รายละเอียด
A	ทำให้เกิดมะเร็งในคน
B1 หรือ B2	อาจจะทำให้เกิดมะเร็งในคน B1: มีข้อมูลจำกัดที่เชื่อมโยงการเกิดมะเร็งในคน B2: ไม่มีหลักฐานการทำให้เกิดมะเร็งในคน (มีหลักฐานการเกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง)
C	มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดมะเร็ง
D	ไม่มีการจัดลำดับการเกิดมะเร็งในคน
E	มีหลักฐานการไม่ทำให้เกิดมะเร็งในคน

ที่มา: Louvar and Louvar (1998)

โลหะหนักที่ทำการศึกษาคือสารเคมีที่จัดอยู่ในประเภทของสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในกลุ่ม A ตามตารางที่ 5 จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ สารหนู โครเมียม และนิกเกิล สารก่อมะเร็งประเภท B1 จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม ส่วนตะกั่วมีการระบุว่าเป็นสารก่อมะเร็งประเภท B2 ดังนั้นจึงควรมีการประเมินความเสี่ยงจากการได้รับสารต่างๆ ดังกล่าวเข้าไปในร่างกาย

สารเคมีที่จัดอยู่ในกลุ่ม A, B1, B2 และ C ให้นำมาประเมินหาค่าความเป็นพิษของการเกิดมะเร็ง (slope factor) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ (dose) และผลกระทบต่อร่างกาย (response) ในหน่วยของความเสี่ยงต่อค่ามวลสารที่ได้รับ ต่อน้ำหนักร่างกายต่อวัน สามารถหาได้จากสมการที่ (6)

$$\text{slope factor} = \text{risk} / \text{unit dose} \quad (6)$$

เมื่อ	<i>slope factor</i>	=	ค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ก่อมะเร็ง
	<i>risk</i>	=	ค่าความเสี่ยง
	<i>unit dose</i>	=	ปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ (mg/ (kg-day))

9.2.2.5 ขั้นตอนที่ 5 สรุปข้อมูลความเป็นพิษ

รวบรวมข้อมูลความเป็นพิษต่างๆ ได้แก่ ทางเข้าสู่ร่างกาย ความถี่ของการสัมผัส ระยะเวลาในการสัมผัส และปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับแล้วทำให้เกิดผลกระทบ

9.2.3 ลักษณะความเสี่ยง (risk characteristic)

ลักษณะความเสี่ยง เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการประเมินความเสี่ยง ซึ่งจะมีการคาดการณ์ความเสี่ยงออกมาเป็นตัวเลขระดับความเสี่ยง เป็นขั้นตอนเชื่อมระหว่างการประเมินความเสี่ยงและการจัดการความเสี่ยง ขั้นตอนการกำหนดลักษณะความเสี่ยงโดยทั่วไปมี 5 ขั้นตอน แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการกำหนดลักษณะความเสี่ยง

ที่มา: คัดแปลงจาก U.S Environmental Protection Agency (1989)

9.2.3.1 ขั้นตอนที่ 1 ทบทวนปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับและค่าความเป็นพิษ

การทบทวนผลที่ได้จากการประเมินปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ และค่าความเป็นพิษของสารเคมี ประกอบด้วยข้อมูลต่อไปนี้ ได้แก่

ก) ขั้นตอนการประเมินปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับ เป็นการคาดการณ์ปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับในแต่ละทางที่สารเคมีสามารถเข้าสู่ร่างกายได้

ข) ขั้นตอนการประเมินพิษ เป็นการหาค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ทำให้เกิดมะเร็ง (slope factor) จัดกลุ่มของสารเคมีที่ทำให้เกิดมะเร็งตามแนวโน้มของการเกิดมะเร็ง (weight of evidence) หาค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง (reference dose) ของสารเคมีทุกชนิด

9.2.3.2 ขั้นตอนที่ 2 หาปริมาณความเสี่ยงของสารเคมีแต่ละชนิด

การหาค่าความเสี่ยงของสารเคมีแต่ละชนิด สามารถแยกได้เป็น ความเสี่ยงของสารเคมีที่ได้รับแล้วทำให้คนเกิดมะเร็งและไม่เกิดมะเร็ง ดังนี้

ก) การคำนวณความเสี่ยงในการเกิดมะเร็ง คำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$cancer\ risk = CDI \times \left(CSF \times \left(\frac{BW}{70kg} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (7)$$

เมื่อ	<i>cancer risk</i>	= ความเสี่ยงที่ทำให้คนเกิดมะเร็ง
	<i>CDI</i>	= ปริมาณสารเคมีที่คนได้รับเป็นประจำทุกวันเป็นเวลามากกว่า 70 ปี, chronic daily intake (mg/ (kg-day))
	<i>CSF</i>	= ค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ทำให้เกิดมะเร็ง, cancer slope factor (mg/ (kg-day)) ⁻¹
	<i>BW</i>	= น้ำหนักร่างกาย (kg)

ข) การคำนวณความเสี่ยงในการไม่เกิดมะเร็ง โดยใช้ค่าแสดงความเสี่ยง (hazard quotient) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$hazard\ quotient = \frac{E}{\left(RfD \times \left(\frac{BW}{70kg} \right)^{\frac{1}{3}} \right)} \quad (8)$$

เมื่อ	<i>hazard quotient</i>	= ค่าแสดงความเสี่ยงในการไม่เกิดมะเร็ง
	<i>E</i>	= ปริมาณสารเคมีที่คนได้รับ, exposure(mg/ (kg-day))
	<i>RfD</i>	= ค่าความเป็นพิษของสารเคมีที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง, reference dose (mg/ (kg-day))
	<i>BW</i>	= น้ำหนักร่างกาย (kg)

9.2.3.3 ขั้นตอนที่ 3 รวมปริมาณความเสี่ยงของสารเคมีหลายชนิดรวมกัน

การรวมปริมาณความเสี่ยงของสารเคมีหลายชนิดเข้าด้วยกัน สามารถแยกได้เป็นความเสี่ยงของสารเคมีที่ได้รับแล้วทำให้คนเกิดมะเร็งและไม่เกิดมะเร็ง ดังนี้

ก) การคำนวณความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งของสารเคมีหลายชนิดรวมกัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$cancer\ risk_T = \sum_{i=1}^{i=n} cancer\ risk_i \quad (9)$$

เมื่อ $cancer\ risk_T$ = ความเสี่ยงรวมในการเกิดมะเร็งของสารเคมีหลายชนิด
 $cancer\ risk_i$ = ความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งของแต่ละสารเคมี

ข) การคำนวณดัชนีความเสี่ยงในการไม่เกิดมะเร็งของสารเคมีหลายชนิดรวมกัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$hazard\ quotient_T = \sum_{i=1}^{i=n} hazard\ quotient_i \quad (10)$$

เมื่อ $hazard\ quotient_T$ = ความเสี่ยงรวมในการไม่เกิดมะเร็งของสารเคมีหลายชนิด
 $hazard\ quotient_i$ = ความเสี่ยงในการไม่เกิดมะเร็งของแต่ละสารเคมี

9.2.3.4 ขั้นตอนที่ 4 รวมความเสี่ยงของสารเคมีทุกทางที่เข้าสู่ร่างกาย

การรวมปริมาณความเสี่ยงของสารเคมีทุกทางที่เข้าสู่ร่างกาย สำหรับในกรณีที่มีการได้รับเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง สำหรับงานวิจัยนี้ได้รับเข้าสู่ร่างกายจากการสัมผัสทางหายใจ ทางกรกลืนกิน และทางผิวหนัง การรวมความเสี่ยงของสารเคมีสามารถแยกได้เป็นความเสี่ยงของสารเคมีที่ได้รับแล้วทำให้คนเกิดมะเร็งและไม่เกิดมะเร็งดังนี้

ก) การคำนวณความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งของสารเคมีในทุกทางที่เข้าสู่ร่างกาย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$cancer\ risk_T = cancer\ risk_{inhalation} + cancer\ risk_{ingestion} + cancer\ risk_{dermal} \quad (11)$$

เมื่อ	$cancer\ risk_T$	=	ความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งรวม
	$cancer\ risk_{inhalation}$	=	ความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งจากการหายใจ
	$cancer\ risk_{ingestion}$	=	ความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งจากการกลืนกิน
	$cancer\ risk_{dermal}$	=	ความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งจากการสัมผัสทางผิวหนัง

ข) การคำนวณดัชนีความเสี่ยงในการไม่เกิดมะเร็งของสารเคมีในทุกทางที่เข้าสู่ร่างกาย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12)

$$hazard\ index = HQ_{inhalation} + HQ_{ingestion} + HQ_{dermal} \quad (12)$$

เมื่อ	$hazard\ index$	=	ดัชนีความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง
	$HQ_{inhalation}$	=	ค่าแสดงความเสี่ยงในการไม่เกิดมะเร็งจากการหายใจ
	$HQ_{ingestion}$	=	ค่าแสดงความเสี่ยงในการไม่เกิดมะเร็งจากการกลืนกิน
	HQ_{dermal}	=	ค่าแสดงความเสี่ยงในการไม่เกิดมะเร็งจากการสัมผัสทางผิวหนัง

9.2.3.5 ขั้นตอนที่ 5 พิจารณาพื้นที่ที่มีความเสี่ยง

พิจารณาและตัดสินใจพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากข้อมูลที่ได้จากการประเมินทั้งหมด โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณาความเสี่ยงและดัชนีความเสี่ยง คือ กรณีสารก่อมะเร็ง ความเสี่ยงระหว่าง $1.00E-06$ ถึง $1.00E-04$ เป็นความเสี่ยงที่ยอมรับได้ และกรณีสารไม่ก่อมะเร็ง ดัชนีความเสี่ยงน้อยกว่า 1 เป็นดัชนีความเสี่ยงที่ยอมรับได้ (Kolluru *et al.*, 1996)

9.3 การจัดการความเสี่ยง (risk management)

การจัดการความเสี่ยงเป็นการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการประเมินความเสี่ยงทั้งหมด มาพิจารณาพร้อมกับข้อมูลทางเทคนิค งบประมาณ สิ่งแวดล้อม และสังคม เพื่อหาแนวทางในการจัดการความเสี่ยงที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

9.3.1 หาทางเลือกในการจัดการความเสี่ยง

9.3.2 ตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดเพื่อจัดการความเสี่ยง

9.3.3 วางแผนงานเพื่อจัดการความเสี่ยง

9.3.4 ปฏิบัติตามแผนงานที่กำหนดไว้

9.3.5 ตรวจสอบติดตามการปฏิบัติงานตามแผนงานเป็นระยะ เพื่อให้บรรลุตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ และต้องมีการทบทวน ถ้าไม่เป็นไปตามแผนงานที่กำหนดไว้

Schuhmacher *et al.* (2009) ได้รวบรวมข้อมูลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพมนุษย์ที่อาศัยอยู่ใกล้เคียงโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ Valcarca ประเทศสเปน ที่มีการใช้กากตะกอน (sewage sludge) เพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทนร้อยละ 20 โดยศึกษาปริมาณ PCDD/Fs และ โลหะหนัก (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sn, Tl, V และ Zn) ที่ร่างกายได้รับ 3 ทาง ได้แก่ ทางการหายใจ การดูดซึมผ่านทางผิวหนัง และการกลืนกินดินและฝุ่นละออง พบว่า การประเมินความเสี่ยงต่อการไม่เกิดมะเร็ง (hazard quotient) มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน (<1) ในทางกลับกันการประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งมีค่าเกินมาตรฐาน 1×10^{-6} เล็กน้อย (ระหว่าง 2.76×10^{-6}) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การใช้กากตะกอนเป็นเชื้อเพลิงทดแทนจะทำให้คนเป็นมะเร็ง 4.60 คนต่อล้านคน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์
- 1.2 วัสดุทดแทน ได้แก่ ฝุ่นผงเหล็ก ซิลิโคน ทราวดำ ซิลิโคน และกากตะกอน
- 1.3 เชื้อเพลิงฟอสซิล
- 1.4 เชื้อเพลิงทดแทน
- 1.5 ปูนเม็ด
- 1.6 หิน
- 1.7 ยิปซั่ม

2. อุปกรณ์และสารเคมี

- 2.1 บีกเกอร์ (beaker)
- 2.2 ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask)
- 2.3 ช้อนตักสาร (black spoon)
- 2.4 กระดาษกรอง (filter paper)
- 2.5 กระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter)
- 2.6 ปิเปต (pipette)
- 2.7 ลูกยาง (bubble)
- 2.8 น้ำปราศจากไอออน (deionized water)
- 2.9 กรดไนตริก (nitric acid, HNO_3)
- 2.10 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl)
- 2.11 กรดซัลฟูริก (sulfuric acid, H_2SO_4)
- 2.12 กรดอะซิติก (acetic acid, CH_3COOH)
- 2.13 สารละลายมาตรฐานสารหนู (As- standard solution)
- 2.14 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม (Cd- standard solution)
- 2.15 สารละลายมาตรฐานโครเมียม (Cr- standard solution)

- 2.16 สารละลายมาตรฐานทองแดง (Cu- standard solution)
- 2.17 สารละลายมาตรฐานนิกเกิล (Ni- standard solution)
- 2.18 สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb- standard solution)
- 2.19 สารละลายมาตรฐานวานาเดียม (V- standard solution)
- 2.20 สารละลายมาตรฐานสังกะสี (Zn- standard solution)

3. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (analytical balance)
- 3.2 แผ่นอังความร้อน (hot plate)
- 3.3 เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (rotary agitator)
- 3.4 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด- ด่าง (pH meter)
- 3.5 ชุดกรองสุญญากาศ (vacuum filter)
- 3.6 เครื่อง Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

วิธีการ

1. การวิเคราะห์การปนเปื้อนของโลหะหนัก

วิธีการวิเคราะห์การปนเปื้อนของโลหะหนัก ใช้ตาม Standard method (Eaton *et al.*, 1995) โดยทำการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดไนตริก- กรดไฮโดรคลอริก ตาม method 3030F (nitric acid-hydrochloric acid digestion) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) ยี่ห้อ Perkin elmer รุ่น optima 3000 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างหนัก 1 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไนตริกเข้มข้นจำนวน 8 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง
3. นำบีกเกอร์ไปตั้งบนแผ่นอังความร้อน (hot plate) ที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา
4. รอจนกระทั่งตัวอย่างเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร และทำให้เย็น
5. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 10 มิลลิลิตร

6. เติมน้ำปราศจากไอออนจำนวน 15 มิลลิลิตร และนำไปให้ความร้อน 15 นาที
7. นำบีกเกอร์ลงจากแผ่นอังความร้อน ตั้งทิ้งไว้ให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง จากนั้นกรองสารละลายด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (ภาพที่ 8) ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
8. เก็บตัวอย่างที่ปรับปริมาตรแล้วลงในขวดโพลีเอททิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene bottle) เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
9. นำสารละลายไปวิเคราะห์โลหะหนักเชิงปริมาณด้วยเครื่อง ICP-AES (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 8 ชุดกรองสุญญากาศ

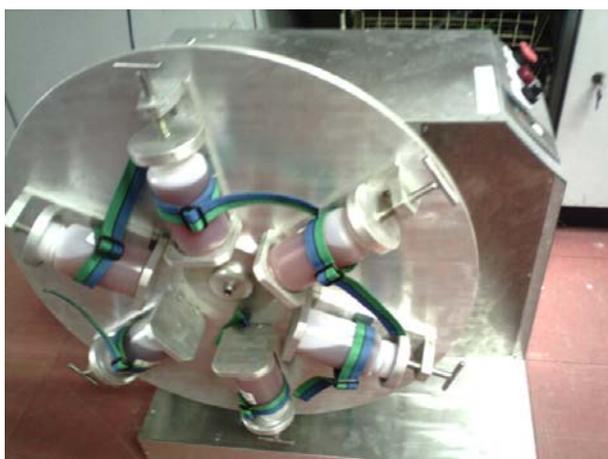


ภาพที่ 9 เครื่อง Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

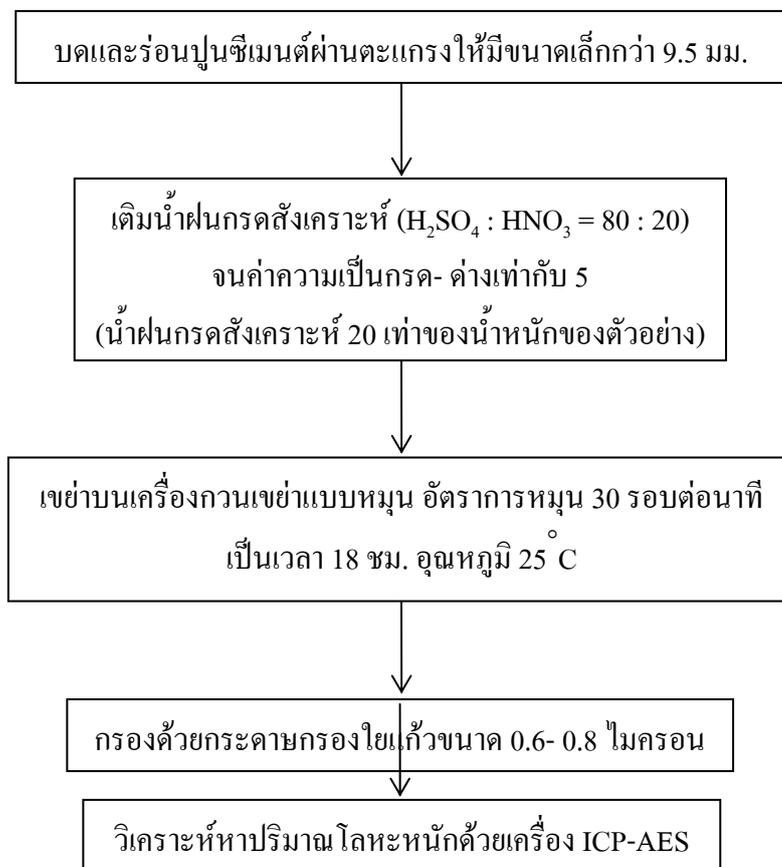
2. การทดสอบการชะโลหะหนักจากปูนซีเมนต์

2.1 การทดสอบการชะโลหะหนักโดยการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540

1. บดตัวอย่างปูนซีเมนต์ให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ (1) หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด (leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง
3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (rotary agitator) (ภาพที่ 10) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายจากการสกัด (leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES



ภาพที่ 10 เครื่องกวนเขย่าแบบหมุนสำหรับทดสอบการชะ



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540

2.2 การทดสอบการชะ โลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

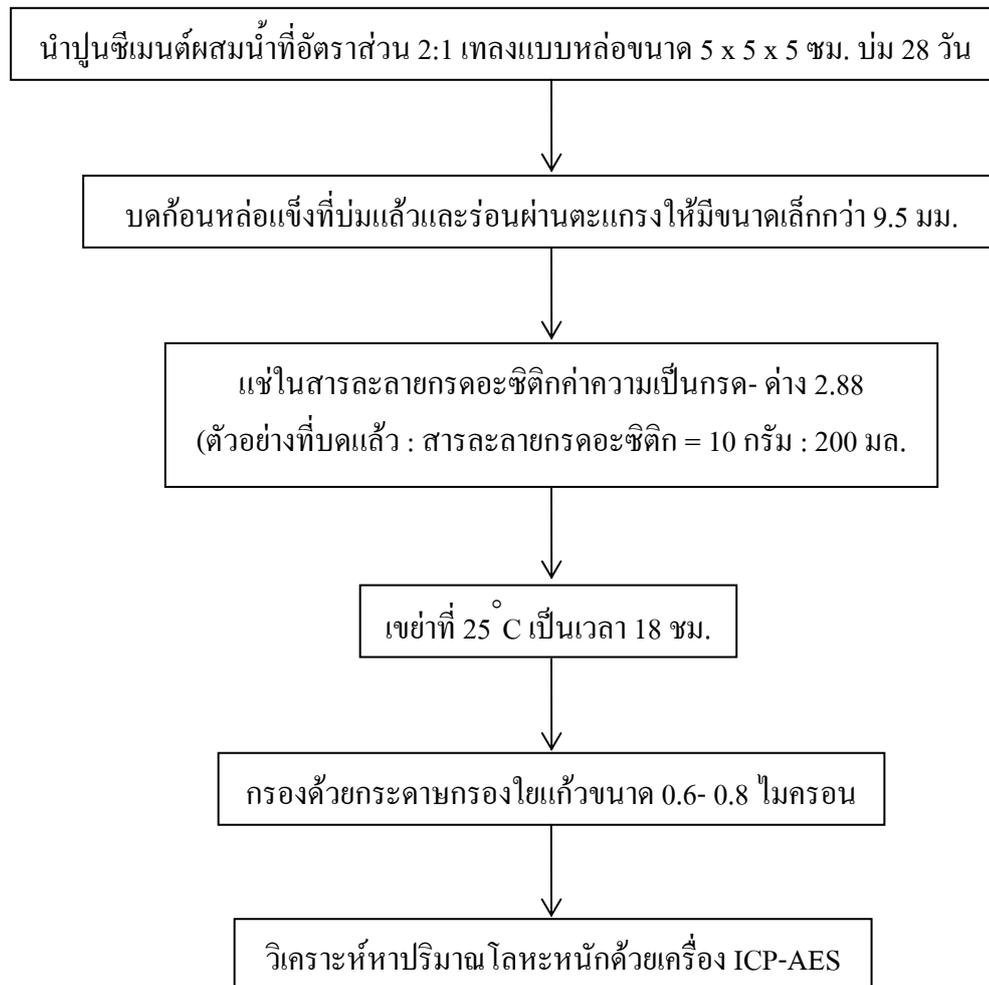
1. นำปูนซีเมนต์มาผสมน้ำในอัตราส่วน 2:1 กวนอย่างช้าๆ เป็นเวลา 30 วินาที และกวนเร็วเป็นเวลา 1 นาที และเทลงแบบหล่อขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร บ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน
2. นำก้อนหล่อแข็งตัวอย่างหลังจากบ่มแล้ว ดังภาพที่ 12 มาบดให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตรหรือเล็กกว่า
3. นำตัวอย่างปูนซีเมนต์ใส่ขวดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง
4. ใส่สารละลายกรดอะซิติกที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2.88 โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักของของแข็งต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 1 : 20
5. นำไปเขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุนที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
6. กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
7. นำสารละลายที่กรองได้ ไปวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES

หมายเหตุ การเตรียมกรดอะซิติกที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.88

นำกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาตร 5.7 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตร 1 ลิตร จะได้สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2.88



ภาพที่ 12 ก้อนหล่อแข็งปูนซีเมนต์



ภาพที่ 13 ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี TCLP

3. การประเมินปริมาณการได้รับสารเคมีต่อผู้สัมผัส

3.1 คำนวณการได้รับสารพิษจากการสัมผัสทางการหายใจ การกลืนกิน และทางผิวหนัง ขณะทำงาน ตามสมการที่ (2) (3) และ (4) ตามลำดับ

3.2 คำนวณความเสี่ยงในการเกิดมะเร็ง จากสมการที่ (6)

3.3 คำนวณความเสี่ยงในการไม่เกิดมะเร็ง จากสมการที่ (7)

3.4 คำนวณผลรวมความเสี่ยงของสารเคมีทุกทางที่เข้าสู่ร่างกายในการเกิดมะเร็งและไม่เกิดมะเร็ง ดังสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ

4. สรุปผลและจัดทำรูปเล่มรายงาน

วิเคราะห์ผลการทดลองและจัดทำรายงาน

5. ระยะเวลาในการทำวิจัย

เริ่มตั้งแต่ เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2550 และสิ้นสุด เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2552

6. สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
กรุงเทพมหานคร

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
กรุงเทพมหานคร

ผลและวิจารณ์

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัยมีการใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิง และวัตถุดิบทดแทนหลายประเภท ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดซื้อจากอุตสาหกรรมจาก โรงงานอื่น เชื้อเพลิงทดแทนที่ใช้ ได้แก่ เศษหิน ไม้ ของเสียประเภทสารละลาย (waste solvent) ฟ้าเบื่อน้ำมัน และกากน้ำมัน โดยเผาพร้อมกับถ่านหินและลิกไนต์ ส่วนวัตถุดิบทดแทนเช่น ฝุ่นสนิม เหล็ก ซิลิโคน ทราชดำ ทราชไสบ และกากตะกอน บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรมจะใช้ ทดแทนไม่เกินร้อยละ 10 ของปริมาณวัตถุดิบเดิม ในระหว่างการวิจัยพบว่า มีการใช้เชื้อเพลิงและ วัตถุดิบทดแทนปริมาณมากที่สุด 499 ตันและน้อยที่สุด 167 ตัน คิดเป็นร้อยละ 6.91 และ 2.31 ตามลำดับ (ตารางที่ 6) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบเดิมรวมทั้งหมด 7221 ตัน และ 7222 ตัน

ตารางที่ 6 ปริมาณของเสียที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทน

ประเภท	ปริมาณการใช้ของเสีย (ตัน/วัน)	
	มากที่สุด	น้อยที่สุด
เชื้อเพลิงทดแทน	39	30
วัตถุดิบทดแทน	460	137
รวมทั้งหมด	499	167

1. สมดุลมวลของโลหะหนักตลอดกระบวนการผลิต

การวิเคราะห์การปนเปื้อนของโลหะหนักในเชื้อเพลิง วัตถุดิบ ปูนเม็ด และปูนซีเมนต์ด้วย วิธีการย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริก พบสารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว วานาเดียม และสังกะสี แสดงดังตารางที่ 7 ความเข้มข้นของโลหะหนักทุกประเภทที่พบใน ปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าในปูนเม็ด เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องมีการผสมหินและยิปซัม ลงในปูนเม็ดจึงทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Zhang *et al.* (2007) นอกจากนี้ระหว่างกระบวนการผลิตในช่วงก่อนความร้อน (pre-heater) วัตถุดิบจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง และเกิดการเผาไหม้ ส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักในวัตถุดิบเกิดการ

ระเหยได้ (Gou and Eckert, 1996) ดังนั้นปริมาณโลหะหนักในปูนเม็ดจึงมีค่าต่ำกว่าวัสดุดิบ จากผลการทดลองของการใช้ของเสียปริมาณมากที่สุดจะเห็นได้ว่าตะกั่วและสังกะสีในวัสดุดิบมี ปริมาณสูงซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ฝุ่นสนิมเหล็ก (iron dust) เป็นวัสดุดิบทดแทน ซึ่งสอดคล้องกับ การทดลองของ Dungan and Dees (2008) ซึ่งอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้ามักใช้ตะกั่วและ สังกะสี เพื่อแปรรูปเป็นอุปกรณ์ต่างๆ โดยผสมตะกั่วกับเหล็กเพื่อถนอมสนิมและเกิดความแข็งแรง และสังกะสีใช้เคลือบผิวด้านนอกอีกครั้งเพื่อถนอมสนิม (กรมทรัพยากรธรณี, 2550) นอกจากนี้ยังพบ โครเมียมปริมาณสูงในวัสดุดิบเนื่องจากการใช้กากตะกอนเป็นวัสดุดิบทดแทน งานวิจัยของ Genon and Brizio (2008) กล่าวว่า การใช้ของเสียประเภทสารละลายใน Swiss cement plant มีผลต่อการ เพิ่มขึ้นของแคดเมียม ปรอท และแอสเบส

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงและวัสดุดิบทดแทน ซึ่งของเสีย ดังกล่าวได้แก่ ซิลิโคน เอ (silicone A) ซิลิโคน อาร์ (silicone R) ซิลิโคน เอส (silicone S) กากตะกอนชีวภาพ (biosludge) กากตะกอน (sludge waste) ทรายดำ (black sand) และผงเหล็ก (iron dust) โดยนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักแสดงดังตารางที่ 8 พบว่า ในกลุ่มของ เสียประเภท silicone มีปริมาณทองแดงสูง (มากกว่า 1,800 mg/kg) และพบโครเมียมสูงใน sludge waste (มากกว่า 20,000 mg/kg) รวมถึงพบตะกั่วและสังกะสีใน iron dust สูง (21,346 และ 136,292 mg/kg ตามลำดับ)

ตารางที่ 7 โลหะหนักในวัสดุดิบ เชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ (mg/kg)

ธาตุ	กระบวนการที่ใช้ของเสียมากที่สุด*				กระบวนการที่ใช้ของเสียน้อยที่สุด**				Standard*** (mg/kg)
	เชื้อเพลิง	วัสดุดิบ	ปูนเม็ด	ปูนซีเมนต์	เชื้อเพลิง	วัสดุดิบ	ปูนเม็ด	ปูนซีเมนต์	
As	8.16±0.04	712.12±10.35	704.06±13.85	653.76±14.91	8.16±0.04	496.56±3.89	661.70±12.34	608.53±3.38	200.00
Cd	657.63±6.72	2288.89±0.27	25.10±0.37	11.08±0.36	657.63±6.72	858.59±0.06	24.62±0.36	10.58±0.40	1000.00
Cr	79.60±1.56	22845.22±5.34	311.68±1.76	256.50±5.18	79.60±1.56	21108.14±1.60	289.27±3.18	220.59±11.69	4000.00
Cu	27.92±1.27	4836.62±5.24	243.44±11.45	224.42±5.45	27.92±1.27	3150.84±7.16	234.12±5.07	213.24±3.64	-
Ni	62.82±1.61	2677.29±2.54	136.96±4.99	112.66±4.00	62.82±1.61	2458.36±1.16	129.03±0.65	102.75±3.21	10000.00
Pb	179.12±0.60	22347.82±5.28	279.26±9.47	244.32±6.22	179.12±0.60	706.31±2.45	260.36±4.02	222.84±9.67	1000.00
V	197.13±0.49	179.25±2.26	123.08±7.34	104.75±3.76	197.13±0.49	117.28±1.51	112.83±2.40	87.28±5.30	2000.00
Zn	235.51±3.56	140310.44±11.98	617.48±6.20	544.92±2.42	235.51±3.56	982.98±5.69	526.26±10.29	492.48±6.29	2000.00

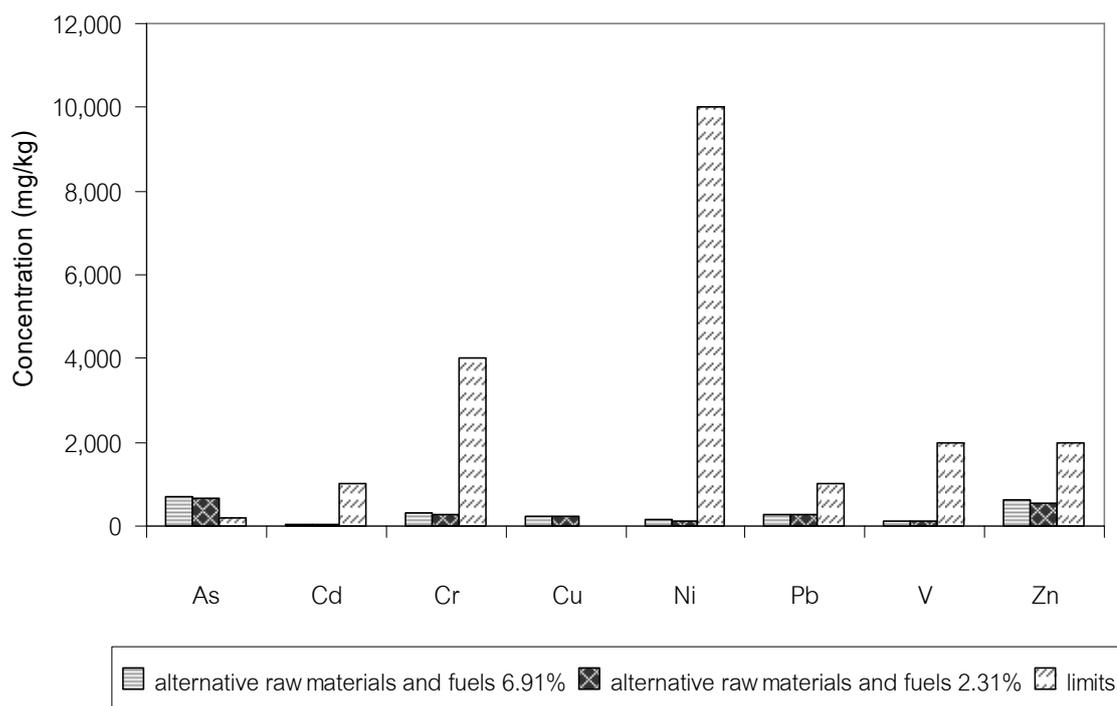
- หมายเหตุ * กระบวนการที่ใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงและวัสดุดิบทดแทน 499 ตัน/ วัน
 ** กระบวนการที่ใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงและวัสดุดิบทดแทน 167 ตัน/ วัน
 *** ค่ามาตรฐานของโลหะหนักในปูนเม็ดของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม
 - ไม่ระบุค่ามาตรฐาน (บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม)

ตารางที่ 8 โลหะหนักในของเสีย

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/kg)						
	silicone A ^a	silicone R ^a	silicone S ^a	biosludge ^b	sludge waste ^c	black sand ^d	iron dust ^e
As	0.00	0.00	0.00	0.85	10.47	6.96	229.15
Cd	53.76	107.57	47.77	117.62	406.36	222.56	1313.02
Cr	39.07	57.64	30.65	58.16	20595.82	206.85	1673.81
Cu	952.82	7.13	1841.84	11.10	95.19	90.55	1693.66
Ni	58.73	34.15	31.42	20.01	2151.20	74.48	201.29
Pb	19.96	151.60	9.99	301.18	185.53	149.51	21346.00
V	0.00	0.00	0.00	0.00	65.01	0.00	62.88
Zn	51.69	331.14	86.93	3073.82	74.86	101.91	136292.00

หมายเหตุ ที่มาของของเสีย

- a : บริษัท เอเชียซิติโคนส์
- b : บริษัท ยงไทย
- c : บริษัท Thainox
- d : บริษัท สยามซานิทารีฟิตตี้
- e : บริษัท สยามยามาโตะ



ภาพที่ 14 โลหะหนักในปูนเม็ดจากการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทน

จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเครื่อง ICP-AES ปูนเม็ดมีความเข้มข้นของโลหะหนัก ทั้ง 8 ชนิด (สารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว วานาเดียม และสังกะสี) ดังภาพที่ 14 ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของแคดเมียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว วานาเดียม และสังกะสี มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนสารหนูที่มีค่าเกินมาตรฐาน จากการเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักแปรผันตามปริมาณของเสียที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จากผลการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Conesa *et al.* (2008) ปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ขี้เถ้าเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น

สมคุณมวลของโลหะหนักตลอดกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แสดงในตารางเข้าได้แก่ ตารางที่ 9 และตารางที่ 10 โดยแบ่งการคำนวณจาก 2 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิตปูนเม็ด ซึ่งมีวัตถุดิบหลัก วัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงน้ำหนักรวม 7,720 ตัน เมื่อเป็นกระบวนการการใช้ของเสียมากที่สุด และในกระบวนการใช้ของเสียที่น้อยที่สุดมีน้ำหนักของสารเข้ารวม 7,389 ตัน โดยมีปูนเม็ดเป็นสารขาออก เนื่องจากปูนเม็ดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ต้องผ่านกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งมีสารเข้าประกอบด้วย ปูนเม็ด ขี้ปี้ และหินในอัตราส่วน

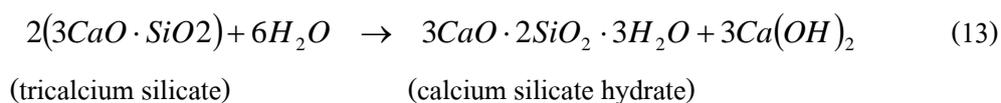
92.50 : 5.00 : 2.50 นำหนักรวมจะได้ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์เป็นสารขาออก ผลคำนวณหาปริมาณที่สูญเสียพบว่า สารหนูและวานาเดียม มีปริมาณการสูญเสียของโลหะหนักประมาณร้อยละ 5-10 เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงจุดเดือดของสารหนู และ วานาเดียม มีค่าเท่ากับ 6,135 และ 3,380 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Yinon, 1996) ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาปูนซีเมนต์ (ประมาณ 2000-2200 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดการสลายตัวเป็นไอของโลหะหนักดังกล่าวน้อย ส่งผลให้ปริมาณสูญเสียมีเพียงเล็กน้อยหลังจากการเผา

เมื่อพิจารณาถึงจุดเดือดของโครเมียม ทองแดง และนิกเกิล มีค่าเท่ากับ 2,672 2,567 และ 2,732 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Yinon, 1996) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาปูนซีเมนต์ ทำให้สามารถสลายตัวเป็นไอได้บางส่วน ส่งผลให้มีปริมาณการสูญเสียของน้ำหนักระหว่างร้อยละ 70-80

ในทางกลับกันจุดเดือดของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาปูนซีเมนต์ (765 1,740 และ 907 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Yinon, 1996)) จึงทำให้เกิดการสลายตัวเป็นไอของโลหะหนักสูง ส่งผลให้ปริมาณของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ลดลงอย่างมากหลังการเผา และมีปริมาณสูญเสียมากกว่าร้อยละ 90

จะเห็นว่าโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบในวัตถุดิบทดแทนสามารถที่จะเปลี่ยนรูปเป็นไอได้เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2001) ได้ทำการศึกษาการหายไปของน้ำหนัโลหะหนักขณะกระบวนการเผาที่ 500 850 และ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่ากลุ่มโลหะหนักแคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี โครเมียม ทองแดง และนิกเกิล น้ำหนักหายไปร้อยละ 30-70 และ ร้อยละ 20-80 ที่อุณหภูมิ 850 และ 1000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยน้ำหนัที่หายไปเกิดจากการเปลี่ยนรูปของโลหะหนักกลายเป็น flue gas ออกไปได้ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของละอองอนุภาคหรืออาจจะถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอย (Evans and Williams, 2000) ในทางกลับกันสารหนูและวานาเดียมมีน้ำหนัหายไปน้อยมากในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว

การคำนวณสมดุลมวลสารของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์พบว่า โลหะหนักเกือบทุกชนิด ติดไปกับปูนซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 80 ยกเว้นแคดเมียมที่ติดไปกับปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 50 จากรายงานของ Pomès *et al.* (2001) กล่าวว่า การสูญหายของแคดเมียมเนื่องจาก แคดเมียมสามารถไปแทนที่แคลเซียมในปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ดังสมการที่ 13 และบางส่วนจะติดอยู่กับพื้นผิวของ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, C-S-H)



ตารางที่ 9 สมดุลมวลของโลหะหนักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนร้อยละ 6.91

ประเภท	พารามิเตอร์	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	
การใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบ ทดแทนร้อยละ 6.91	<u>กระบวนการผลิตปูนเม็ด</u>									
	สารขาเข้า									
		วัตถุดิบหลัก (kg)	3070.21	133.66	1210.53	953.59	700.41	1215.95	339.27	1963.53
		วัตถุดิบทดแทน (kg)	113.82	1043.58	10424.52	2158.45	1182.79	10195.34	58.83	64406.10
		เชื้อเพลิง (kg)	5.33	429.43	51.98	18.23	41.02	116.97	128.73	153.79
	สารขาออก									
		ปูนเม็ด (kg)	2892.28	103.11	1280.38	1000.05	562.63	1147.20	505.61	2536.61
		ปริมาณสูญหาย (%)	9.31	93.58	89.04	68.05	70.76	90.05	4.03	96.19
	<u>กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์</u>									
	สารขาเข้า									
		ปูนเม็ด (kg)	2892.28	103.11	1280.38	1000.05	562.63	1147.20	505.61	2536.61
		ชิปซั่ม (kg)	3.65	0.17	0.78	0.20	0.69	1.21	1.22	0.84
		หิน (kg)	1.06	0.01	0.14	0.00	0.14	0.22	0.05	0.22
	สารขาออก									
	ปูนซีเมนต์ (kg)	2878.86	48.79	1129.51	988.24	496.10	1075.87	461.27	2399.58	
	ปริมาณสูญหาย (%)	0.63	52.76	11.85	1.20	11.95	6.33	8.82	5.44	

ตารางที่ 10 สมมูลมวลของโลหะหนักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนร้อยละ 2.31

ประเภท	พารามิเตอร์	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	
การใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบ ทดแทนร้อยละ 2.31	<u>กระบวนการผลิตปูนเม็ด</u>									
	สารขาเข้า									
		วัตถุดิบหลัก (kg)	3188.13	136.87	1185.14	1086.66	721.16	1262.33	347.80	2238.74
		วัตถุดิบทดแทน (kg)	2.39	114.81	2867.41	409.29	321.95	70.77	8.91	88.57
		เชื้อเพลิง (kg)	4.88	393.26	47.60	16.70	37.57	107.11	117.88	140.83
	สารขาออก									
		ปูนเม็ด (kg)	2728.19	101.51	1192.66	965.28	531.99	1073.46	465.20	2169.77
		ปริมาณสูญหาย (%)	14.62	84.26	70.91	36.19	50.77	25.47	1.98	12.09
	<u>กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์</u>									
	สารขาเข้า									
		ปูนเม็ด (kg)	2728.19	101.51	1192.66	965.28	531.99	1073.46	465.20	2169.77
		ยิปซั่ม (kg)	3.52	0.16	0.76	0.19	0.67	1.18	0.23	0.81
		หิน (kg)	0.93	0.01	0.10	0.00	0.12	0.18	0.06	0.19
	สารขาออก									
	ปูนซีเมนต์ (kg)	2674.66	46.50	969.55	937.25	451.61	979.44	383.62	2164.58	
	ปริมาณสูญหาย (%)	2.12	54.27	18.77	2.92	15.23	8.87	17.59	0.28	

2. การทดสอบการชะโลหะหนักจากปูนซีเมนต์

เนื่องด้วยตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เกิดจากกระบวนการผลิตที่มีการนำของเสียอันตราย (hazardous waste) มาใช้เป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทน โดยมีส่วนประกอบของโลหะหนักที่สามารถถูกชะละลายได้ง่าย นำไปสู่การปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ดิน แหล่งน้ำ ผิวดิน หรือน้ำใต้ดิน ได้ง่าย และโลหะหนักที่มีพิษถาวร เช่น สารหนู แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนรูปไปตามกาลเวลาแล้ว ยังสามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์น้ำได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์การชะโลหะหนักที่สามารถถูกชะละลายออกจากปูนซีเมนต์ ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐานของ US.EPA และวิธีตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

การทดสอบการชะโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) พัฒนามาจากวิธี Extraction Procedure Toxicity (EP) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ทดสอบกับขยะชุมชนและพบว่ายังไม่เหมาะสม (สุรชาติพิศ, 2545) จากรายงานของ Blackburn *et al.* (1988) กล่าวว่า การทดสอบด้วยวิธี TCLP สามารถสกัดโลหะหนักออกจากสารตัวอย่างได้มากกว่าวิธี EP เปรียบเทียบจากค่าเฉลี่ยทางสถิติโดยที่วิธี TCLP มีความเข้มข้นสูงกว่าวิธี EP ถึง 1-3 เท่า และ Hooper *et al.* (1998) กล่าวว่า การทดสอบการชะโลหะหนักด้วยวิธี TCLP ให้ผลการทดลองที่แม่นยำและให้ค่าความเข้มข้นที่สูงที่สุด งานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาการชะโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ โดยวิธี TCLP และวิธีตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบหาปริมาณที่ถูกชะจากสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2540)

การทดสอบการชะโลหะหนักจากปูนซีเมนต์โดยใช้วิธีทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (ตารางที่ 11) พบว่าสารหนู โครเมียมและตะกั่วมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด ทองแดง นิกเกิล วานาเดียม และสังกะสี ไม่มีการกำหนดไว้ในค่ามาตรฐาน สังกะสีมีการชะมากที่สุดถึง 27.07 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อพิจารณาถึงการชะโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมพบว่าแคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิกเกิล วานาเดียม และสังกะสี ถูกชะออกจากปูนซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 80 ในขณะที่สารหนู และตะกั่วมีการชะน้อยกว่าร้อยละ 50 โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Taveekitvanit (2004) พบว่า โครเมียมและสังกะสีมีแนวโน้มที่จะถูกชะออกจากปูนซีเมนต์ได้ง่าย มีค่ามากกว่าร้อยละ 90

การทดสอบการชะโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) แสดงดังตารางที่ 11 พบว่ามีเพียงสารหนูเท่านั้นที่มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด และโลหะหนักทุกชนิดมีการชะออกสู่สิ่งแวดล้อมไม่เกินร้อยละ 50

ร้อยละของการถูกชะจากการทดสอบด้วยวิธีตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมีค่าสูงกว่าวิธี TCLP เนื่องจากการใช้สารชะแต่ละวิธีต่างกัน โดยที่วิธีตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมใช้กรดกำมะถันและกรดไนตริก จึงมีค่าร้อยละการถูกชะสูงมากกว่าร้อยละ 90 ในโครเมียมและสังกะสี ในขณะที่วิธี TCLP ใช้กรดอะซิติก มีค่าร้อยละการถูกชะต่ำกว่าร้อยละ 40 ในทุกชนิดของโลหะหนัก

ตารางที่ 11 การทดสอบการชะโลหะหนักจากปูนซีเมนต์

วิธีทดสอบ	ธาตุ	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l)		ค่ามาตรฐาน* (mg/l)	Leached fraction (%)	
		กระบวนการณ์ที่มี ของเสียมากที่สุด	กระบวนการณ์ที่มี ของเสียน้อยที่สุด		กระบวนการณ์ที่มี ของเสียมากที่สุด	กระบวนการณ์ที่มี ของเสียน้อยที่สุด
กระทรวงอุตสาหกรรม	As	15.69 ± 3.30	13.61 ± 1.41	5	47.99	44.73
	Cd	0.53 ± 0.02	0.50 ± 0.01	1	95.13	94.33
	Cr	11.09 ± 0.52	10.39 ± 0.24	5	86.45	94.20
	Cu	10.99 ± 1.13	10.29 ± 0.47	-	97.95	96.50
	Ni	4.94 ± 1.19	4.41 ± 0.63	-	87.77	85.76
	Pb	6.12 ± 0.80	5.33 ± 0.29	5	50.11	47.83
	V	5.07 ± 0.29	4.12 ± 0.10	-	96.76	94.32
	Zn	27.07 ± 0.91	24.61 ± 0.44	-	99.35	99.93
TCLP	As	6.26 ± 0.01	8.50 ± 0.07	5	19.14	27.95
	Cd	0.06 ± 0.00	0.05 ± 0.00	1	10.83	10.21
	Cr	2.86 ± 0.06	4.38 ± 0.07	5	22.32	39.68
	Cu	0.22 ± 0.00	0.18 ± 0.00	-	1.92	1.65
	Ni	0.81 ± 0.00	1.01 ± 0.00	-	14.40	19.68
	Pb	1.40 ± 0.02	1.89 ± 0.01	5	11.46	16.96
	V	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00	-	0.36	0.53
	Zn	1.47 ± 0.01	1.51 ± 0.01	-	5.41	6.14

หมายเหตุ * ค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมและ US.EPA

3. การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ

การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของคนจากการสัมผัสปูนซีเมนต์ที่ปนเปื้อนโลหะหนักจำนวน 8 ชนิด ได้แก่ สารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว วานาเดียม และสังกะสี ประเมินการเข้าสู่ร่างกายโดยการสัมผัส 3 ทาง คือ การหายใจ การกลืนกิน และทางผิวหนังของพนักงานก่อสร้าง ตารางที่ 12 แสดงผลสำรวจและค่าตัวแปรที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยง โดยการสำรวจกลุ่มพนักงานก่อสร้างตึกสูง 4 ชั้น ซึ่งพบว่าพนักงานที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับปูนซีเมนต์ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง จำนวน 6 วันต่อสัปดาห์ ส่วนของช่วงระยะเวลาในการสัมผัสอ้างอิงจากฐานข้อมูลซึ่งระบุประชากรวัยแรงงานอยู่ในช่วง 15 – 59 ปี (สมเกียรติ, 2545) และน้ำหนักร่างกายโดยเฉลี่ยของคนไทยประมาณ 53.5 กิโลกรัม (ธีซช, 2550)

จากตารางที่ 13 แสดงค่าความเป็นพิษของโลหะหนักแต่ละชนิดเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งและไม่เกิดมะเร็ง จะเห็นได้ว่าสารหนู โครเมียม และนิกเกิล จัดอยู่ในกลุ่มของสารเคมีที่ก่อให้เกิดมะเร็งในคน สำหรับแคดเมียมและตะกั่ว อยู่ในกลุ่มของสารเคมีที่อาจจะก่อให้เกิดมะเร็งในคน จึงมีค่า cancer slope factor สำหรับใช้ในการคำนวณค่าความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง แต่ทองแดง วานาเดียม และสังกะสีถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารเคมีที่มีไม่มีการจัดลำดับการก่อให้เกิดมะเร็งในคน จึงไม่มีค่าสำหรับคำนวณความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง

ตารางที่ 12 ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัส

ตัวแปร	คำอธิบาย	ความหมาย	ค่าที่ใช้คำนวณ	แหล่งข้อมูล
C	chemical concentration	ความเข้มข้นของสารเคมี ในปูนซีเมนต์	ตารางที่ 9 และ 10	ผลการวิเคราะห์การสกัดโลหะหนักในปูนซีเมนต์
R _{IH}	inhalation rate	อัตราการหายใจ	0.83 m ³ /hr	Kofi, 1998
t _E	duration exposure	ช่วงเวลาที่รับการสัมผัส	8 hr/d	สอบถามจากคนงานก่อสร้าง
R _{IG}	ingestion rate	อัตราการกลืนกิน	100 mg/d	Lagoy, 1987
K _M	conversion factor	แฟคเตอร์ที่ใช้แปลงค่า ปริมาตร	10 ⁻⁶ kg/mg	Louvar and Louvar, 1998
f _I	fraction ingested	แฟร็กชันของการกลืนกิน	1 unitless	Dolislager, 2006
A _S	skin surface area	พื้นที่ผิวหนังที่สัมผัส	8620 cm ² /event	Louvar and Louvar, 1998 (คิดจากพื้นที่แขน มือและขาของเพศชาย)
R _A	adherence factor	ค่าคงที่การซึมเข้าผิวหนัง	0.75 mg/cm ²	Louvar and Louvar, 1998
ABS	absorption factor	แฟคเตอร์ของการดูดซึม	1 x 10 ⁻³	Louvar and Louvar, 1998
f _E	exposure frequency	ความถี่ในการสัมผัส	288 d/yr	สอบถามจากคนงานก่อสร้าง
D _t	exposure duration	ช่วงระยะเวลาในการสัมผัส	45 yr	สมเกียรติ, 2545
BW	body weight	น้ำหนักร่างกาย	53.5 kg	ธีชช, 2550
t _{avg}	average time period	ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่สัมผัส	25550 d	สอบถามจากคนงานก่อสร้าง

ตารางที่ 13 ค่าความเป็นพิษของสารเคมี

ธาตุ	Cancer Potency	Cancer Slope Factor (CSF) (mg/kg-day) ⁻¹			Reference Dose (RfD) (mg/kg-day)		
		Inhalation	Ingestion	Dermal	Inhalation	Ingestion	Dermal
		As	A	1.51E+01 ^a	1.50E+00 ^d	7.50E+00 ^d	8.60E-06 ^c
Cd	B1	6.32E+00 ^a	3.80E-01 ^d	1.90E+00 ^d	5.70E-05 ^a	5.00E-04 ^f	1.00E-04 ^f
Cr	A	4.21E+00 ^a	3.40E-01 ^d	1.70E+00 ^d	3.00E-05 ^a	5.00E-03 ^d	1.00E-03 ^d
Cu	D	-	-	-	6.90E-04 ^c	4.00E-02 ^f	8.00E-03 ^f
Ni	A	8.40E-01 ^b	-	-	5.00E-02 ^c	2.00E-02 ^f	4.00E-03 ^f
Pb	B2	4.00E-02 ^c	-	-	3.60E-03 ^b	3.50E-03 ^f	7.00E-04 ^f
V	D	-	-	-	7.00E-03 ^c	7.00E-03 ^d	1.40E-03 ^d
Zn	D	-	-	-	1.00E-02 ^c	2.00E-01 ^d	4.00E-02 ^d

หมายเหตุ - : ไม่พบข้อมูลอ้างอิง

ที่มา: a: US.EPA-United States Environmental Protection Agency

b: Louvar and Louvar, 1998

c: Health Canada

d: RAIS- The Risk Assessment Information System

e: CalEPA- California Environmental Protection Agency

f: Schuhmacher *et al.*, 2009

ผลการประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง (ตารางที่ 14) จากการสัมผัสปูนซีเมนต์ของ
 คนงานที่ทำงานก่อสร้าง พบว่า ทองแดง วานาเดียม และสังกะสี ไม่สามารถคำนวณค่าความเสี่ยงต่อ
 การเกิดมะเร็งได้ทั้ง 3 ทางการสัมผัส เนื่องจากอยู่ในกลุ่ม D ซึ่งระบุว่าไม่มีการจัดลำดับการเกิด
 มะเร็งในคน ในส่วนของการได้รับสัมผัสทางการหายใจพบว่ามีค่าน้อยมากจึงไม่มีนัยสำคัญในการ
 หาความเสี่ยงรวม แต่ในทางกลับกันการได้รับสัมผัสทางการกลืนกินและทางผิวหนังมีค่าความเสี่ยง
 สูงในกรณีศึกษาที่ 1 ที่มีการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุติดทนร้อยละ 6.91 มีค่า $8.50E-04$ และ $2.75E-04$
 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ $1.00E-06$ ถึง $1.00E-04$ และค่าความเสี่ยงรวมต่อ
 การเกิดมะเร็งของสารหนูมีค่าเกินมาตรฐานเพียงธาตุเดียวพบว่าในกรณีศึกษาที่ 1 มีค่า $1.13E-03$
 และกรณีศึกษาที่ 2 มีค่า $1.05E-03$ โดยทั้งสองกรณีศึกษานี้สามารถกล่าวได้ว่าสารหนูสามารถทำให้
 คนงานที่ได้รับสัมผัสเกิดมะเร็ง 11 และ 10 คน ต่อคนงาน 10000 คน ตามลำดับ

ผลการประเมินค่าความเสี่ยงต่อการไม่เกิดมะเร็งแสดงดังตารางที่ 15 พบว่าโลหะหนักทุก
 ชนิดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน (น้อยกว่า 1) เนื่องจากค่าความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสทางการหายใจ
 การกลืนกิน และทางผิวหนัง ที่คำนวณได้มีค่าน้อยมาก จึงไม่มีนัยสำคัญต่อการคำนวณค่าความ
 เสี่ยงรวม ซึ่งหมายความว่าคนงานไม่มีความเสี่ยงต่อไม่เกิดมะเร็งเมื่อได้รับสัมผัสปูนซีเมนต์ขณะ
 ปฏิบัติงาน ถึงแม้ว่าสารหนูจะมีค่าความเสี่ยงรวมมากที่สุดคือ $1.83E-01$

ตารางที่ 14 ความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง

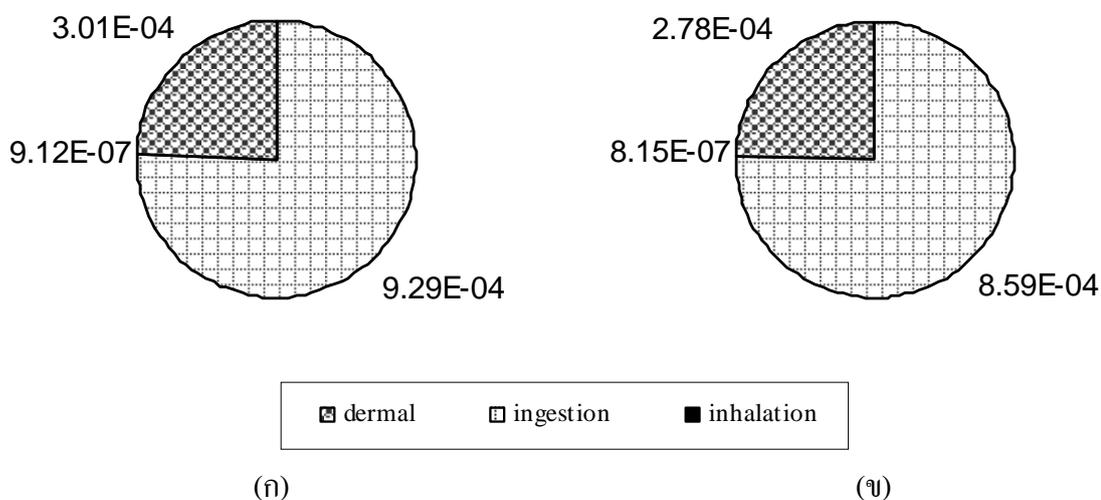
Exposure parameter	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
Inhalation risk								
กรณีที่ 1: 6.91% ทดแทน	4.32E-07	3.06E-09	4.72E-07	nc	4.14E-09	4.49E-10	nc	nc
กรณีที่ 2: 2.31% ทดแทน	4.02E-07	2.92E-09	4.06E-07	nc	3.78E-09	4.09E-10	nc	nc
Ingestion risk								
กรณีที่ 1: 6.91% ทดแทน	8.50E-04	3.65E-06	7.56E-05	nc	nc	nc	nc	nc
กรณีที่ 2: 2.31% ทดแทน	7.91E-04	3.48E-06	6.50E-05	nc	nc	nc	nc	nc
Dermal risk								
กรณีที่ 1: 6.91% ทดแทน	2.75E-04	1.18E-06	2.44E-05	nc	nc	nc	nc	nc
กรณีที่ 2: 2.31% ทดแทน	2.56E-04	1.13E-06	2.10E-05	nc	nc	nc	nc	nc
Total								
กรณีที่ 1: 6.91% ทดแทน	1.13E-03	4.83E-06	1.00E-04	nc	4.14E-09	4.49E-10	nc	nc
กรณีที่ 2: 2.31% ทดแทน	1.05E-03	4.61E-06	8.64E-05	nc	3.78E-09	4.09E-10	nc	nc
ค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้	1.00E-06 ถึง 1.00E-04							

หมายเหตุ nc : not calculated

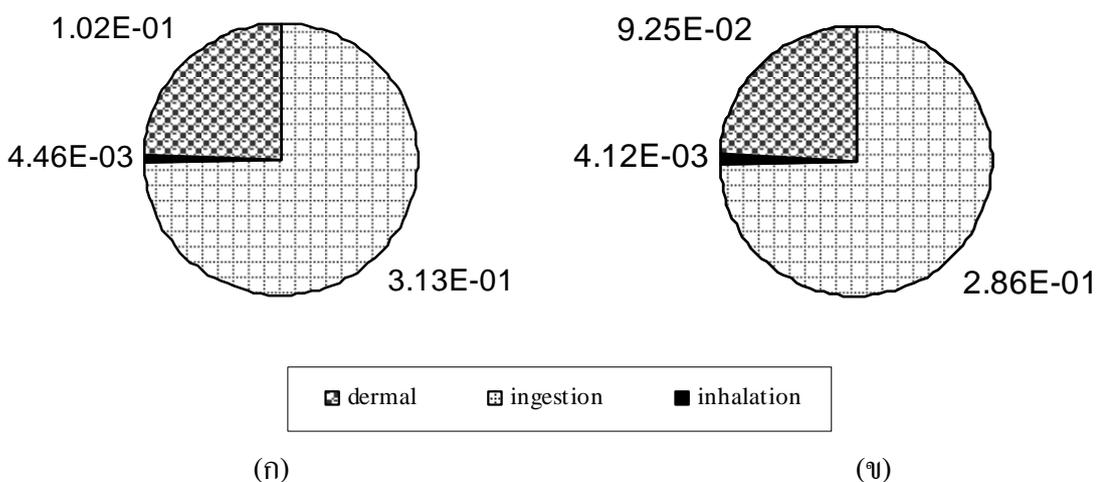
ตารางที่ 15 ความเสี่ยงต่อการไม่เกิดมะเร็ง

Exposure parameter	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
Inhalation risk								
กรณีที่ 1: 6.91% ทดแทน	3.98E-03	1.02E-05	4.47E-04	1.70E-05	1.18E-07	3.55E-06	7.83E-07	2.85E-06
กรณีที่ 2: 2.31% ทดแทน	3.70E-03	9.71E-06	3.85E-04	1.62E-05	1.08E-07	3.24E-06	6.52E-07	2.58E-06
Ingestion risk								
กรณีที่ 1: 6.91% ทดแทน	1.35E-01	2.23E-02	5.32E-02	5.82E-03	5.84E-03	7.24E-02	1.55E-02	2.82E-03
กรณีที่ 2: 2.31% ทดแทน	1.26E-01	2.19E-02	4.57E-02	5.53E-03	5.33E-03	6.60E-02	1.29E-02	2.55E-03
Dermal risk								
กรณีที่ 1: 6.91% ทดแทน	4.38E-02	7.43E-03	1.72E-02	1.88E-03	1.89E-03	2.34E-02	5.02E-03	9.13E-04
กรณีที่ 2: 2.31% ทดแทน	4.08E-02	7.09E-03	1.48E-02	1.79E-03	1.72E-03	2.13E-02	4.18E-03	8.25E-04
Total								
กรณีที่ 1: 6.91% ทดแทน	1.83E-01	2.97E-02	7.08E-02	7.72E-03	7.73E-03	9.58E-02	2.05E-02	3.74E-03
กรณีที่ 2: 2.31% ทดแทน	1.71E-01	2.90E-02	6.09E-02	7.34E-03	7.05E-03	8.73E-02	1.71E-02	3.38E-03
ค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้	< 1							

ค่าความเสี่ยงรวมทุกชนิดของโลหะหนักในกรณีศึกษาที่มีการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนร้อยละ 6.91 และ 2.31 แสดงดังภาพที่ 15 พบว่า ค่าความเสี่ยงรวมต่อการเกิดมะเร็งมีค่า $1.23\text{E-}03$ และ $1.14\text{E-}03$ ตามลำดับ และทั้งสองกรณีศึกษาจะเห็นได้ว่าค่าความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสจากการกลืนกินมีค่ามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 75 ของทั้ง 3 ทางกรที่ได้รับสัมผัส ในขณะที่ค่าความเสี่ยงรวมต่อการไม่เกิดมะเร็งรวมทุกชนิดของโลหะหนักทั้งสองกรณีศึกษามีค่า 0.42 และ 0.38 แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 15 ค่าความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง (ก) กระบวนการที่มีการใช้ของเสียร้อยละ 6.91
(ข) กระบวนการที่มีการใช้ของเสียร้อยละ 2.31



ภาพที่ 16 ค่าความเสี่ยงต่อการไม่เกิดมะเร็ง (ก) กระบวนการที่มีการใช้ของเสียร้อยละ 6.91
(ข) กระบวนการที่มีการใช้ของเสียร้อยละ 2.31

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 6.91 และ 2.31 เมื่อประเมินผลกระทบจากโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว วานาเดียม และสังกะสี ที่ปนเปื้อนอยู่ในปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ โดยวิเคราะห์ปริมาณสูญหายของโลหะหนักจากการคำนวณสมดุลมวลของโลหะหนักตลอดกระบวนการผลิต ทดสอบการชะโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ และการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพคนงานจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยทางการหายใจ การกลืนกิน และการดูดซึมทางผิวหนัง ในงานก่อสร้างอาคารหอพักนักศึกษา สามารถสรุปผลการทดลองที่สำคัญ ได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนของโลหะหนัก พบว่า ปริมาณโลหะหนักในปูนเม็ดมีค่าต่ำกว่าวัตถุดิบ แต่ปูนเม็ดมีค่าสูงกว่าปูนซีเมนต์ และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสูญหายของโลหะหนักจากการคำนวณสมดุลมวลของโลหะหนัก พบว่า แคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี มีปริมาณสูญหายสูงมากกว่าร้อยละ 90 แต่ในขณะที่สารหนูและวานาเดียมมีปริมาณสูญหายต่ำกว่าร้อยละ 10

2. การทดสอบการชะโลหะหนักจากปูนซีเมนต์โดยใช้ 2 วิธีคือ การทดสอบด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และวิธีทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ผลที่ได้พบว่า สารหนู โครเมียมและตะกั่วมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม แต่สำหรับวิธี TCLP พบว่ามีเพียงสารหนูเท่านั้นที่มีค่าเกินมาตรฐาน US.EPA กำหนด เมื่อพิจารณาถึงร้อยละของการถูกชะจะเห็นได้ว่า ปูนซีเมนต์ที่ทำการทดสอบด้วยวิธีตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมีค่าสูงกว่าวิธี TCLP

3. ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพในการเกิดมะเร็งต่อคนงาน พบว่า มีค่าความเสี่ยงอยู่ในช่วง $2.75E-04$ ถึง $8.50E-04$ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ คืออยู่ระหว่าง $1.00E-06$ ถึง $1.00E-04$ เนื่องจากพบปริมาณสารหนูสูงในปูนซีเมนต์ จึงส่งผลให้มีค่าความเสี่ยงสูงต่อการเกิดมะเร็ง ดังนั้นจึงต้องมีการลดการใช้ผงเหล็กเป็นวัตถุดิบทดแทน ด้วยเหตุที่ว่าพบสารหนูในผงเหล็กปริมาณมาก และมีค่าดัชนีความเสี่ยงที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็งอยู่ระหว่าง $3.38E-03$ ถึง $1.83E-01$ โดยอยู่ในเกณฑ์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้คือ น้อยกว่า 1

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณสารหนูมีค่าเกินกว่าค่าความเสี่ยงที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตาม คนงานก่อสร้างสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งจากการได้รับสารพิษ โดยลดช่วงเวลาการทำงานของคนงานในแต่ละวัน และควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกัน เช่น ถุงมือ ผ้าปิดจมูก เป็นต้น เพื่อลดความเสี่ยงจากการได้รับสารพิษจากปูนซีเมนต์เข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ และผิวหนัง

งานวิจัยนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบการชะด้วยวิธีตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม โดยจะต้องมีการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างก่อนและหลังการชะเพื่อทำให้ทราบการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ และเนื่องจากมีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ได้ใช้แล้ว พ.ศ.2548 โดยปรับเปลี่ยนให้คล้ายคลึงกับวิธี TCLP ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบการชะด้วยวิธีการดังกล่าว เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ US.EPA

ผลการคำนวณสมมูลมวลของโลหะหนัก จะเห็นว่า มีการสูญหายไปของโลหะหนักโดยจะถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอย ดังนั้น จึงควรมีการเก็บตัวอย่างเถ้าลอยเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนัก เพื่อให้การคำนวณสมมูลมวลครบถ้วนสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. 2550. แร่โลหะพื้นฐาน. ตะกั่ว-สังกะสี. แหล่งที่มา:

http://58.137.128.181/ewtadmin/ewt/dmr_web/ewt_news.php?nid=573, 22 มกราคม 2552.

จักรราวุธ บัณฑิตน์. 2550. กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์. wet process. แหล่งที่มา:

<http://guru.sanook.com/encyclopedia>, 28 มกราคม 2552.

ธีซัช บุญญะการกุล. 2550. การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพ, ใน เอกสารประกอบการบรรยาย
การประชุมวิชาการสมาคมพิษวิทยาแห่งประเทศไทย ปี 2550. กรุงเทพฯ.

บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด. 2548. รายงานการพัฒนาย่างยั่งยืน.

บริษัท เอส ซี ไอ อีโค เซอร์วิส จำกัด. 2550. แนวคิดการปล่อยมลพิษที่เป็นศูนย์. SCIECO
SERVICES CO., LTD. แหล่งที่มา: <http://www.scieco.co.th/thai/zeroconcept.html>,
28 มกราคม 2552.

สุชาติพิศ สิ้นยัง. 2548. ผลของวานาเดียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และการวิเคราะห์
การชะล้าง. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุชาติพิศ อินทรวงศ์. 2545. การเปรียบเทียบวิธีการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสี้ยน
ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และถ้ำลอยลิกไนต์เป็นวัสดุยึดประสาน. วิทยานิพนธ์
ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมเกียรติ ศิริรัตนพฤษ์. 2545. อาชีวอนามัยและความปลอดภัยสำหรับกลุ่มผู้ทำงานที่มีลักษณะ
พิเศษเฉพาะ. การจัดบริการทางอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแก่บุคลากรทางการแพทย์
แหล่งที่มา: <http://www.envocc.org/downloads/outsystemlabor/femalelaborhealth.ppt>,
17 มิถุนายน 2552.

อุทัย ดิยะวิสุทธิศรี. 2534. คู่มือหลักสูตรเข้มข้นการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง **Inductively Couple Plasma Emission Spectrometer**. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

เอกดนัย กอกิมพงษ์. 2549. ICP เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุโดยพลาสมา. **LAB today** 5 (36): 19-24.

Alp, I., H. Deveci and H. Süngün. 2008. Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. **Journal of Hazardous Materials**. 159: 390-395.

Berman, E. 1980. **Toxic metals and their analysis**. Cambridge University Press, London.

Bishop, P.L. 1986. Prediction of heavy metal leaching rates from stabilized/solidified hazardous wastes, in toxic and hazardous wastes, pp. 236-252. **Proceedings of the 18 th mid-Atlantic industrial waste conference**.

Canadian international development agency. 2002. **Persistent Organic Pollutants (POPs) Toolkit**. (CD-Rom). Hatfield consultants and the world bank.

Chang, E.E., P.C. Chiang, P.H. Lu and Y.W. Ko. 2001. Comparisons of metal leachability for various wastes by extraction and leaching methods. **Chemosphere**. 45: 91-99.

Conesa, J.A., A. Gálvez, F. Mateos, I.M. Gullón and R. Font. 2008. Organic and inorganic pollutants from cement kiln stack feeding alternative fuels. **Journal of Hazardous Materials**. 158: 585-592.

Davies, N.T. 1980. Studies on the absorption of zinc by rat intestine. **British Journal of Nutrition**. 43: 189-203.

Dolislager, F. 2006. **On-site agricultural exposure scenario exposure to soil groundwater and homegrown produce**. The risk assessment information system. Available Source: http://rais.ornl.gov/homepage/tm/for_ag.shtml, June 17, 2009.

_____. 2006. **Toxicity profiles**. The risk assessment information system. Available Source: http://rais.ornl.gov/tox/rap_toxp.shtml, June 20, 2009.

Dungan, R.S. and N.H. Dees. 2008. The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands. **Journal of Environmental Management**. 90: 539-548.

Eaton, A.D., L.S. Clesceri and A.E. Greenberg. 1995. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, Washington, DC.

Evans, J. and P.T. Williams. 2000. Heavy metal adsorption onto flyash in waste incineration flue gases. **Trans IChemE**. 78: 40-46.

Genon, G. and E. Brizio. 2008. Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. **Waste Management**. 28: 2375-2385.

Guo, Q. and J. O. Eckert. 1996. Heavy metal outputs from a cement kiln co-fired with hazardous waste fuels. **Journal of Hazardous Materials**. 51: 47-65.

Hammond, B. and R.R. Beliles. 1980. **Metal in casarett and doll's toxicology**. 2nd ed. McMillan Publ. Co. Inc., New York.

Harrison, R.M. and D.H. Laxen. 1981. **Lead pollution causes and control**. The University Press, Cambridge.

Hawley, G.G. 1973. **The encyclopedia of chemistry**. Van Nostrand Reinhold company, New York.

- _____. 1977. **The condensed chemical dictionary**. 9th ed. Van Nostrand Reinhold company, New York.
- Hegstrom, J. and D.S. Stephen. 1989. Heavy metal accumulation in small mammals following sewage sludge application to forests. **Journal of Environmental Quality**. 18: 345-349.
- Hooper, K., M. Iskander, G. Sivia, F. Hussein, J. Hsu, M. Deguzman, Z. Odion, Z. Ilejay, F. Sy, M. Petreas and B. Simmons. 1998. Toxicity characteristic leaching procedure fails to extract oxoanion forming element that are extracted by municipal solid waste leachates. **Environmental Science and Technology**. 32: 3825-3830.
- Kääntee, U., R. Zevenhoven, R. Backman and M. Hupa. 2002. Modelling a cement manufacturing process to study possible impacts of alternative fuels, pp. 81-92. **Recycling and waste treatment in mineral and metal processing**. Luleå, Sweden.
- Karstensen, K.H. 2007. Formation, release and control of dioxins in cement kilns. **Chemosphere**. 70: 543-560.
- Kofi, A.D. 1998. **Risk assessment in environmental management**. John wiley and sons Ltd. England.
- Kolluru, R.V., S.M. Bartell, R.M. Pitblado and R.S. Stricoff. 1996. **Risk assessment and management handbook**. McGraw-Hill, Inc.
- Lagoy, P.K. 1987. Estimated soil ingestion rates for use in risk assessment. **Risk Analysis**. 7: 355-359.
- Lee, T.J. 1983. Effects of environmental metals on reproduction, pp. 253-273. In T.W. Clarkson, G.F. Nordberg and P.R. Sager, eds. **Reproductive and Developmental Toxicity of Metals**. Prenum Press, New York.

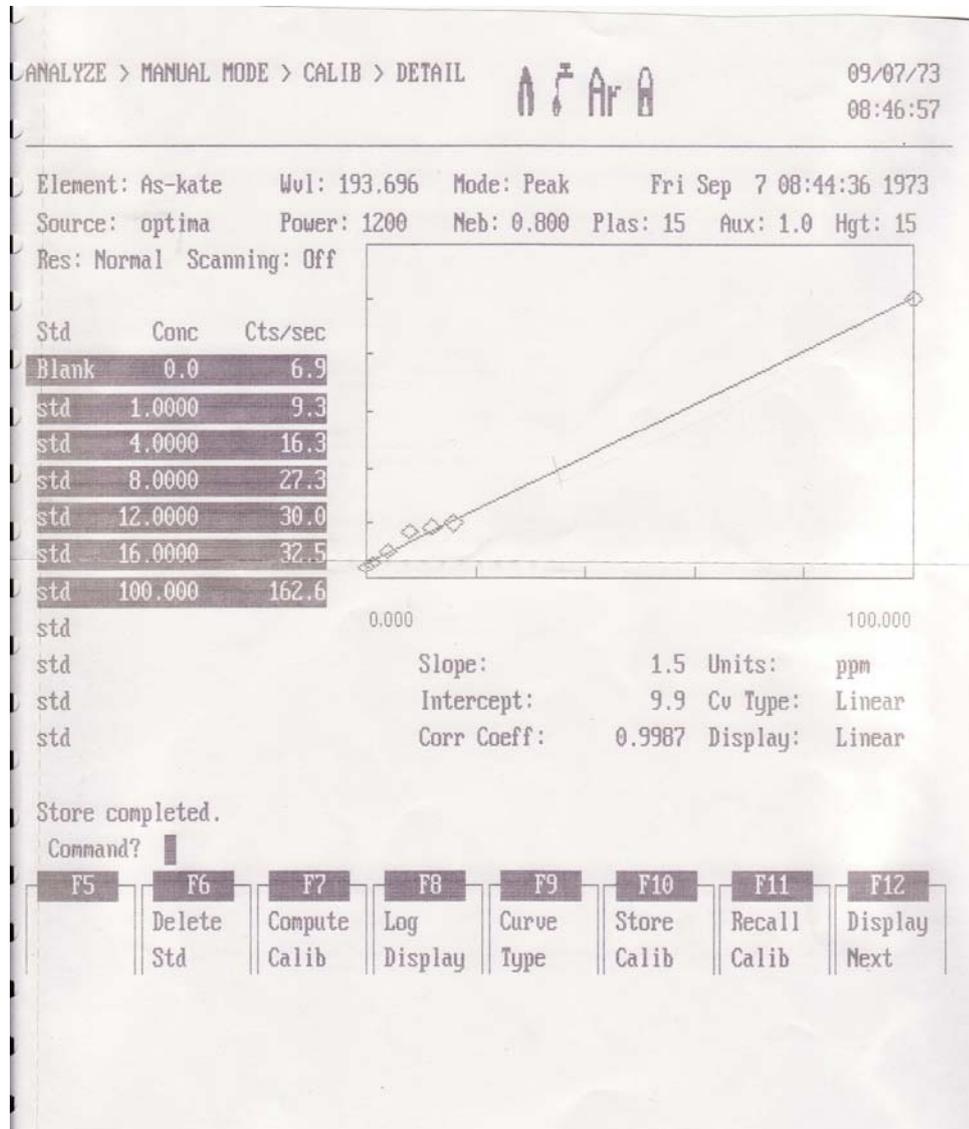
- Loo, W.V. 2008. Dioxin/furan formation and release in the cement industry. **Environmental Toxicology and Pharmacology**. 25: 128-130.
- Louvar, J.F. and B.D. Louvar. 1998. **Health and environmental risk analysis**. Prentice-Hall, Inc., United States of America.
- McNeely, R.N., V.P. Neimanis and L. Dewyer. 1979. **Water quality sourcebook: a guide to water quality parameters**. Inland water directorate, Ottawa.
- Mokrzycki, E. and A.U. Bochenczyk. 2003. Alternative fuels for the cement industry. **Applied Energy**. 74: 95-100.
- Pipilikaki, P., M. Katsioti, D. Papageorgior, D. Fragoulis and E. Chaniotakis. 2005. Use of tire derived fuel in clinker burning. **Cement and Concrete Composites**. 27: 843-847.
- Pomiès, M.P., N. Lequeux and P. Boch. 2001. Speciation of cadmium in cement Part II. C₃S hydration with Cd²⁺ solution. **Cement and Concrete Research**. 31: 571-576.
- Puertas, F., I.G. Diaz, A. Barba, M.F. Gazulla, M. Palacios, M.P. Gómez and S.M. Ramirez. 2008. Ceramic wastes as alternative raw materials for portland cement clinker production. **Cement and Concrete Composites**. 30: 798-805.
- Reilly, C. 1980. **Metal Contamination of Food**. Applied Science Publ. Ltd., London.
- Robert, A.G. 1989. Non-metallothionien bound calcium in the pathogenesis of cadmium nephrotoxicity in the rat. **Toxicology and Applied Pharmacology**. 101: 232-244.
- Rupert, D. and B. Jones. 1994. Mercury concentration in stomach contents and muscle of five fish species from the North East Coast of England. **Marine Pollution Bullatin**. 28: 741-745.

- Schuhmacher, M., M. Nadal and J.L. Domingo. 2009. Environmental monitoring of PCDD/Fs and metals in the vicinity of a cement plant after using sewage sludge as a secondary fuel. **Chemosphere**. 74: 1502-1508.
- Sikalidis, C.A., A.A. Zabaniotou and S.P. Famellos. 2002. Utilisation of municipal solid waste for mortar production. **Research Conservation and Recycling**. 36: 155-167.
- Sobolev, K., P. Türker, S. Soboleva and G. Iscioglu. 2007. Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. **Waste Management**. 27: 971-976.
- Taveekitvanit, E. 2004. **Leaching behavior of heavy metals from cement derived from the co-burning of hazardous waste**. M.S. Thesis, Chulalongkorn University.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1989. **Glossary of Term Related of Health Exposure and Risk Assessment**. Air Risk Information Support Centre.
- Yinon, B. 1996. **Periodic table: chromium**. Chemical elements. Available Source: <http://www.chemicalelements.com/elements/cr.html>, August 22, 2009.
- Zabaniotou, A. and C. Theofilou. 2008. Green energy at cement kiln in Cyprus use of sewage sludge as a conventional fuel substitute. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 12: 531-541.
- Zhang, J., J. Liu, C. Li, Y. Nie and Y. Jin. 2007. Comparison of the fixation of heavy metals in raw material, clinker and mortar using a BCR sequential extraction procedure and NEN 7341 test. **Cement and Concrete Research**. 36: 675-680.

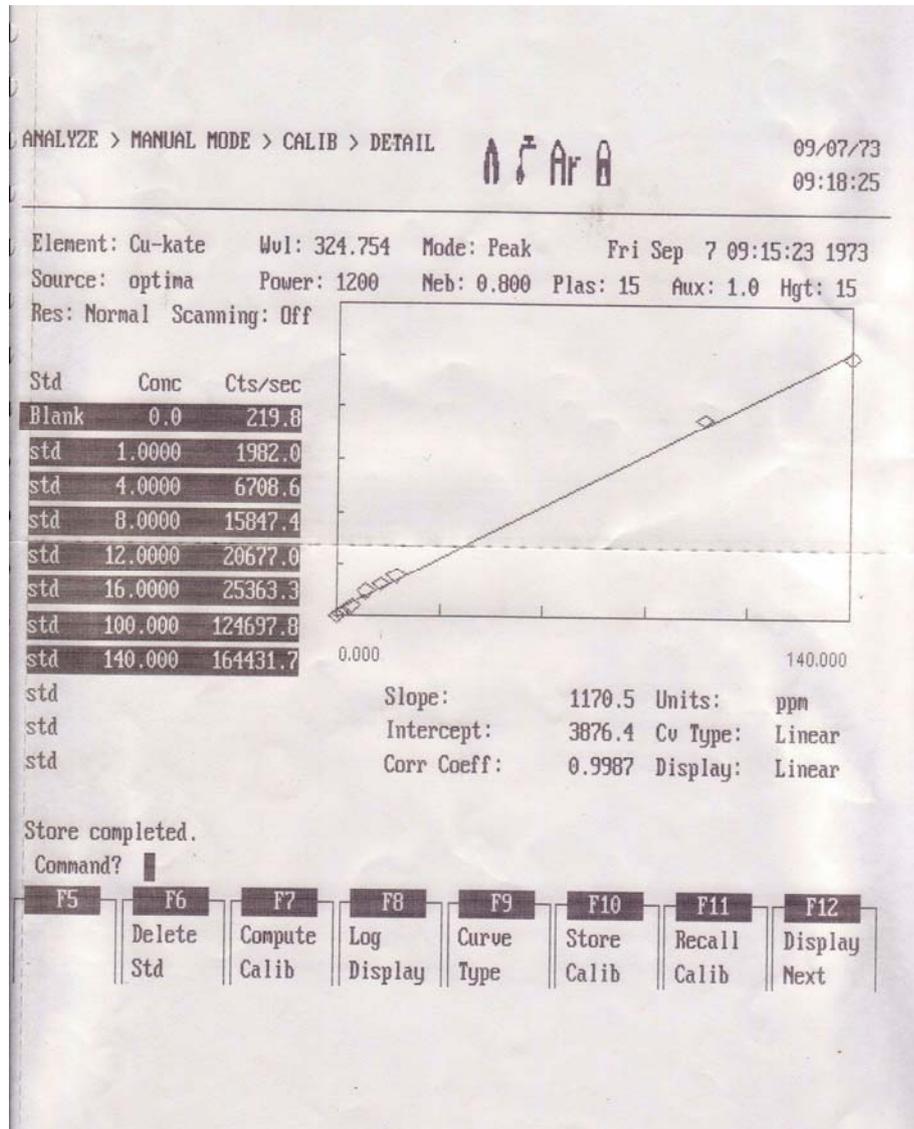
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
กราฟมาตรฐาน

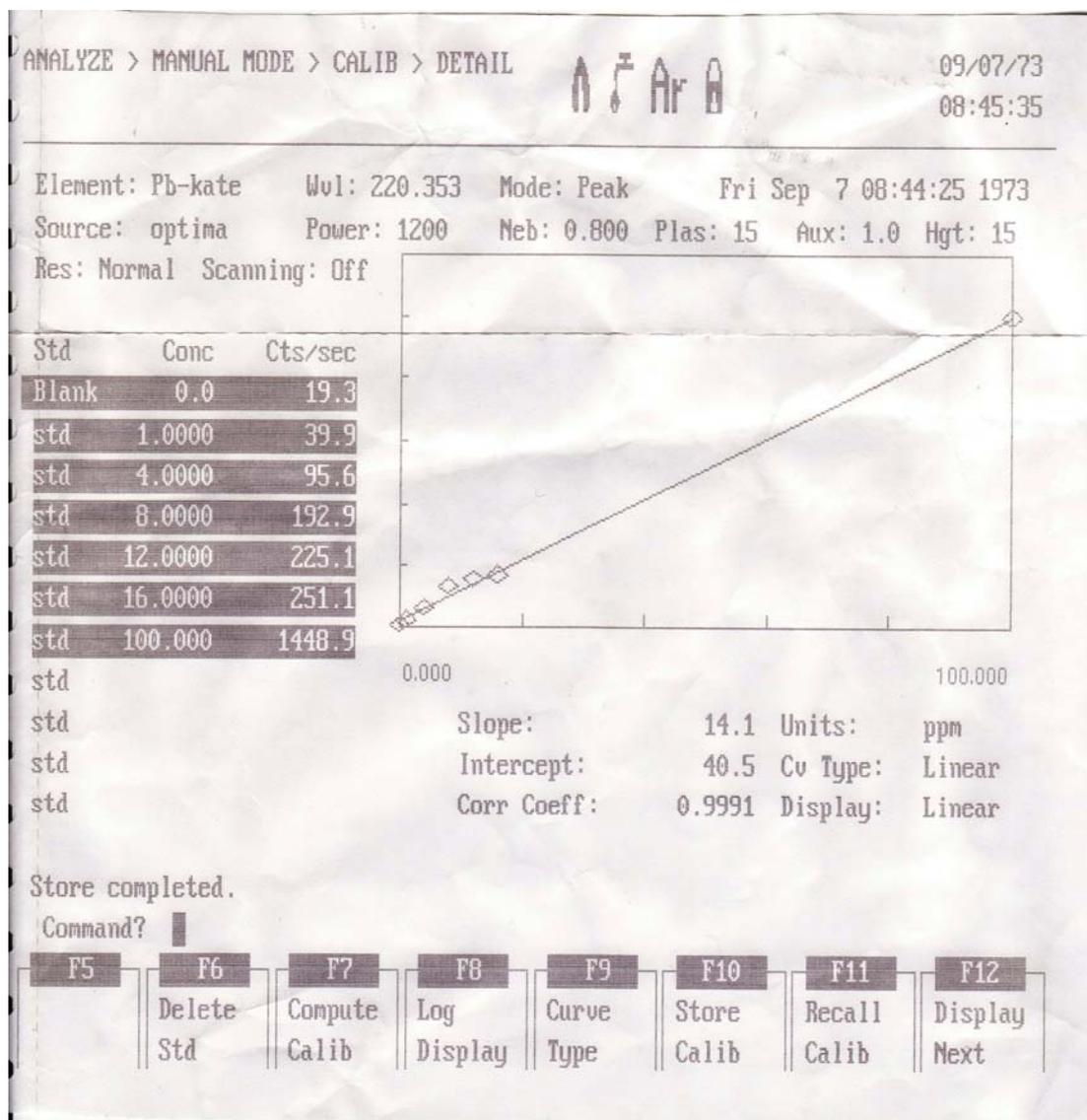
กราฟมาตรฐานของโลหะหนักที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี Inductively Coupled Plasma Spectroscopy



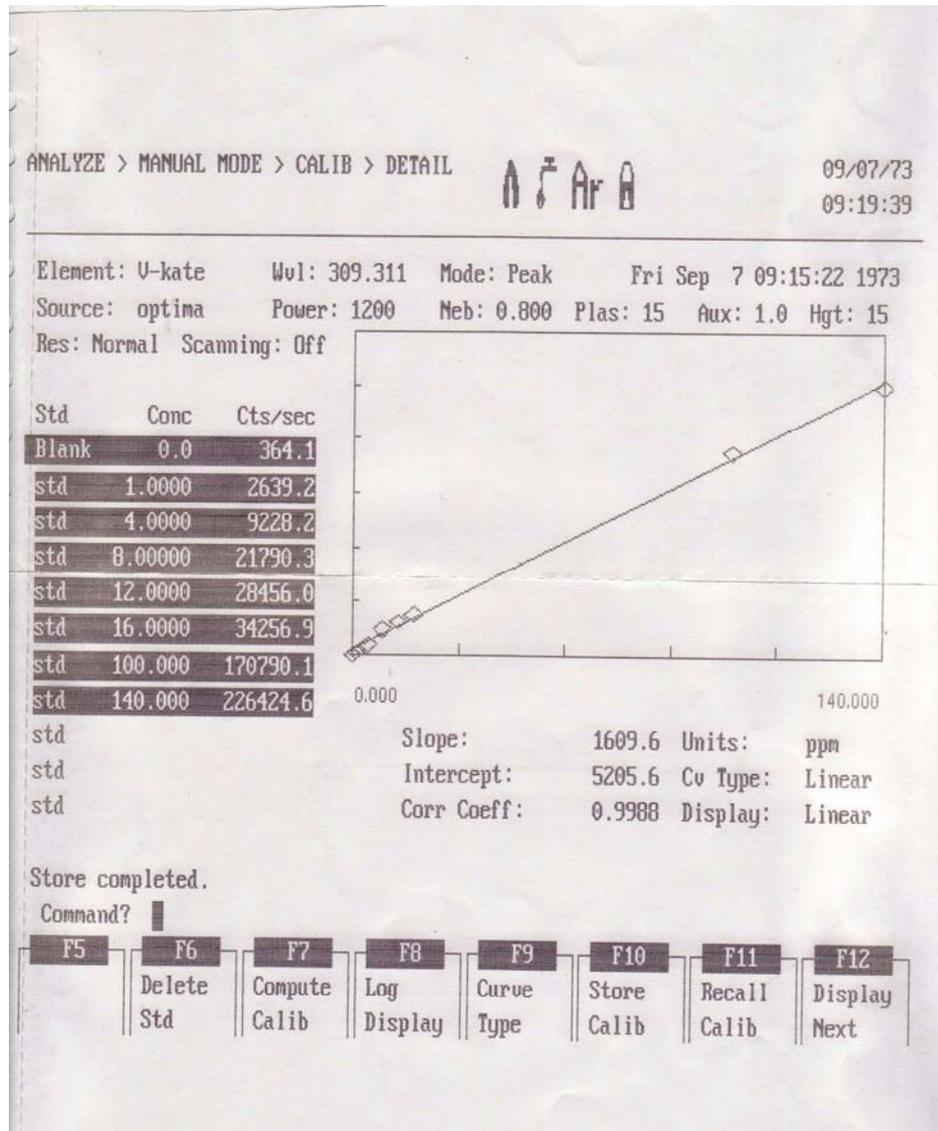
ภาพผนวกที่ ๑1 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณสารหนู



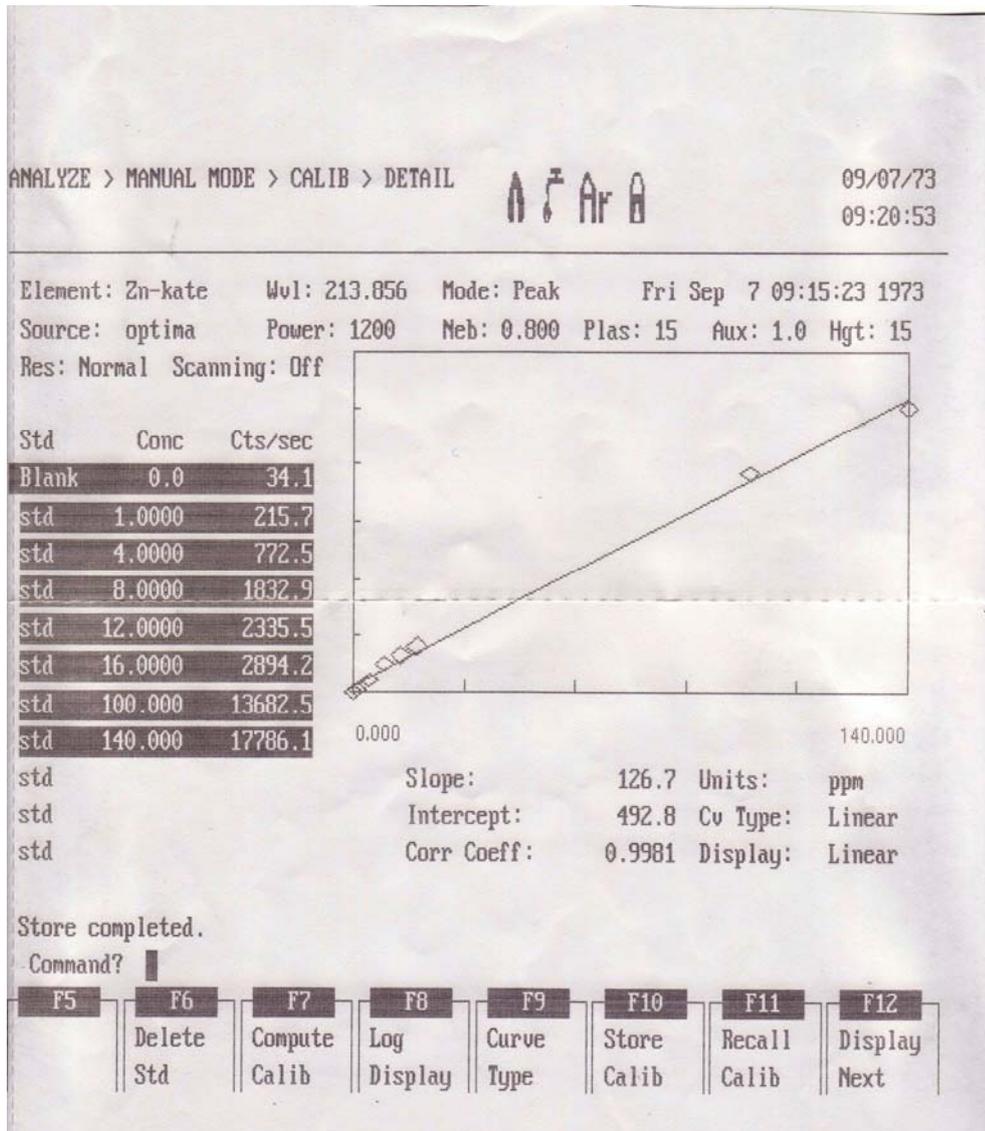
ภาพผนวกที่ ๓4 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณทองแดง



ภาพผนวกที่ 6 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว



ภาพผนวกที่ ก7 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณวานาเดียม



ภาพผนวกที่ ๓8 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสี

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่าง

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่าง

เมื่อปริมาณ โลหะหนักที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน	9.41 mg/l
น้ำหนักของตัวอย่างใช้	1.00 g
ปริมาตรของสารละลายที่เตรียม	50.00 ml
ในสารละลายปริมาตร 1000 ml มีโลหะหนักอยู่	9.41 mg
ในสารละลายปริมาตร 50 ml มีโลหะหนักอยู่	$\frac{(9.41\text{mg}) \times (50\text{ml})}{1000\text{ml}}$
	= 0.4705 mg
นั่นคือ น้ำหนักสารตัวอย่าง 1.00 g มีโลหะหนักอยู่	0.4705 mg
ดังนั้น น้ำหนักสารตัวอย่าง 1000 g จะมีโลหะหนักอยู่	$\frac{(0.4705\text{mg}) \times (1000\text{g})}{1.00\text{g}}$
	= 470.50 mg/kg

ตารางผนวกที่ ข1 เปอร์เซนต์การได้กลับคืน (%recovery)

โลหะหนัก	True value (mg/kg)	ปริมาณที่วัดได้ (mg/l)	ปริมาณที่คำนวณได้ \pm SD (mg/kg)	% recovery
As	380.00	7.38	368.95 ± 7.73	97.09
Cd	0.90	0.02	0.82 ± 0.10	90.77
Cr	31.10	0.55	27.36 ± 3.08	87.97
Cu	4.70	0.08	4.20 ± 0.02	89.47
Ni	11.00	0.18	9.25 ± 0.19	84.06
Pb	213.00	4.01	200.41 ± 5.78	94.09
V	21.70	0.40	20.04 ± 0.02	92.34
Zn	93.80	1.70	84.96 ± 2.36	90.58

ภาคผนวก ค

ปริมาณการได้รับสารพิษเข้าสู่ร่างกาย (intake)

ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาณการได้รับสารพิษจากการสัมผัสปูนซีเมนต์ (mg/kg-d)

โลหะหนัก	$I_{\text{Inhalation}}$	$I_{\text{Ingestion}}$	I_{Dermal}
As	3.13E-08	6.20E-04	4.01E-05
Cd	5.30E-10	1.05E-05	6.79E-07
Cr	1.23E-08	2.43E-04	1.57E-05
Cu	1.07E-08	2.13E-04	1.37E-05
Ni	5.39E-09	1.07E-04	6.91E-06
Pb	1.17E-08	2.32E-04	1.50E-05
V	5.01E-09	9.93E-05	6.42E-06
Zn	2.61E-08	5.17E-04	3.34E-05

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นางสาวเกศสุดา สุขกรม
เกิดวันที่	28 กรกฎาคม 2526
สถานที่เกิด	อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (พ.ศ. 2544)
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัล	-
ทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนโครงการส่งเสริมการวิจัยร่วมแบบทวิภาคี (Bilateral Research Cooperation) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้รับทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี (พ.ศ. 2550)