บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นผงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดเม็ดปูนซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนต่างๆ หินปูนหรือดินปูนขาว กับดินเหนียวหรือดินดาน จนรวมตัวผสมกันสุกพอดีซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอันได้แก่ แคลเซียม และอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิด ขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรม เมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตา (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสำหรับงานก่ออิฐหรือปูนฉาบสำหรับงานฉาบ เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีต ได้แก่ ฐานราก ตอม่อ เขื่อน พื้น และถนน ซึ่งเมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับใช้ในงานพื้น หลังคา สะพาน อุโมงค์ และอื่นๆ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.2 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์อาจจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous materials) ซึ่งอยู่ในรูปของ $CaCO_3$ ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือชอล์ค (Chalk) ดินปูนขาว (Marl)

2. ประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (SiO_2) และอลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous materials) ได้แก่ ดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินดำหรือดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate)

แต่ในบางครั้ง วัตถุดิบทั้งสองประเภทข้างต้นอาจมีปริมาณของธาตุที่ต้องการน้อยไป หรือมีปริมาณของธาตุอื่นเพิ่มเติมมากเกินกว่าที่จำเป็น จึงจำเป็นต้องปรับส่วนผสมให้พอเหมาะเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น การเพิ่มปริมาณแร่เหล็ก (Iron ore) ซึ่งมีอยู่มากใน

ศิลาแลง (Laterite) นอกจากนี้ยังมีการเติมยิบซัม (Gypsum) เพื่อใช้เป็นสารหน่วงการก่อตัวโดยผสมรวมกับปูนเม็ดจากเตาเผา เป็นต้น (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.3 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์

กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ จำแนกออกตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็น 2 วิธี คือ

1. กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)
2. กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ ดินสอพอง ดินเหนียว ถูกนำมาผสมให้ได้สัดส่วนที่พอเหมาะตามต้องการ โดยเติมน้ำลงไปช่วยในการผสม แล้วนำไปบดให้ละเอียดก่อนที่จะป้อนเข้าไปในเตาเผา กรรมวิธีการผลิตแบบแห้งนั้น วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ หินปูนและดินดาน จะถูกนำมาผสมกันในสภาพแห้งๆให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ แล้วนำไปบดให้ละเอียดก่อนป้อนเข้าไปในเตาเผา

เมื่อนำวัตถุดิบมาบดละเอียดและผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะแล้ว ส่วนผสมนี้จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาเผา เตาเผาส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้ใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) อุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ 1400-1600 องศาเซลเซียส วัตถุดิบที่ผสมรวมกันและถูกเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ เรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) ปูนเม็ดที่ได้จะทิ้งไว้ให้เย็นตัว จากนั้นนำไปบดละเอียดอีกครั้ง ในขณะทำการบดจะมีการเติมยิบซัมลงไปเล็กน้อย เพื่อหน่วงเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เพื่อให้สะดวกในการนำไปใช้งานต่อไป นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ซีเมนต์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต คือฝุ่นปูน (Cement Kiln Dust, CKD) ซึ่งเป็นอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมก๊าซขณะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งถูกดักจับโดยอุปกรณ์ดักฝุ่น

ในด้านการควบคุมส่วนประกอบของวัตถุดิบทางเคมี กระบวนการทั้งสองจะไม่แตกต่างกันนัก กระบวนการผลิตแบบเปียกจะซับซ้อนน้อยกว่าและเหมาะกว่า แต่ในการปรับปรุงคุณภาพและการเพิ่มชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากวัตถุดิบที่มีอยู่ กระบวนการผลิตแบบแห้งสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียก สำหรับกรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศ ปัจจุบันนิยมผลิตแบบแห้งซึ่งจัดเป็นกรรมวิธีที่ทันสมัยที่สุด เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตไม่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อย (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540)

2.1.3.1 กรรมวิธีผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ตั้งอยู่ที่อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี เตาเผามี 6 เตาในโรงงานมีกำลังการผลิตปูนเม็ดรวม 38500 ตันต่อวัน กระบวนการผลิตนั้นเริ่มต้นจากการระเบิดหินปูน (Limestone) และหินเชล (Shale) จากเหมืองหิน

ในเขตพื้นที่สัมปทาน ซึ่งวัตถุดิบทั้งสองชนิดนี้จะถูกนำมาเข้าเครื่องย่อยขนาดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดต่ำกว่า 80 มิลลิเมตร ในการผลิตปูนเม็ด 1 ตัน ต้องใช้หินปูนประมาณ 1.6 ตัน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 80 ของวัตถุดิบ หลังจากผ่านขั้นตอนของการย่อยขนาด หินที่ได้จะถูกนำมาผสมรวมกับวัตถุดิบพื้นฐานอื่นๆ เช่น แร่เหล็ก (Iron Ore) โดยจะถูกนำมาบดผสมรวมกันจนละเอียดเป็นผงฝุ่นในหม้อบดขนาดใหญ่ (Grinding Mill) จากนั้นทั้งหมดก็จะถูกผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันในไซโลผสมฝุ่นวัตถุดิบ (Homogenizing Silo) ก่อนส่งเข้าไปยังหออบความร้อน (Preheater Tower) และไหลเข้าสู่เตาเผา หลังจากผ่านขั้นตอนของเตาเผาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าปูนเม็ด ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังห้องลดความร้อนและลำเลียงไปเก็บไว้ในไซโล สำหรับในกระบวนการขั้นสุดท้ายนั้น ปูนเม็ดจะถูกนำไปบดรวมกับยิปซัมและหินปูนในหม้อบดปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ผงตามที่ต้องการ จากนั้นจะถูกส่งไปเก็บยังไซโลเพื่อรอการบรรจุและส่งไปจำหน่ายต่อไป (Siam City Cement Public Company Limited, 2005)

2.1.4 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์

เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพองเหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3. เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

ขั้นตอนที่ 4. เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์

2. ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO Na_2O TiO_2 P_2O_5 และยิปซัม

ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.1

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งได้ให้ชื่อย่อของสารประกอบเหล่านี้ตามอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้ชื่อย่อของออกไซด์ของธาตุใดด้วยอักษรของธาตุนั้นเพียงตัวเดียวกล่าวคือ CaO ย่อเหลือ C , SiO_2 ย่อเหลือตัว S, A l_2O_3 ย่อเหลือตัว

A และ Fe_2O_3 ย่อเหลือตัว F นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆอีกที่ได้หลังจากการเผา เช่น MgO TiO_2 Mn_2O_3 K_2O และNa_2O ซึ่งปะปนอยู่เป็นจำนวนน้อย เมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.1 ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540)

ออกไซด์		ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	CaO	60 – 67
	SiO_2	17 – 25
	Al_2O_3	3 – 8
	Fe_2O_3	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	MgO	0.1 – 5.5
	$Na_2O + K_2O$	0.5 – 1.3
	TiO_2	0.1 – 0.4
	P_2O_5	0.1 – 0.2
	SO_3	1 - 3

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3CaO.SiO_2$	C_3S	33-55
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Sillcate)	$2CaO.SiO_2$	C_2S	15-35
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	7-15
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	5-10

2.1.4.1 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำเป็นมอร์ตาหรือคอนกรีต คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540)

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 จูล/กรัม)	น้อย (250 จูล/กรัม)	สูงมาก (850 จูล/กรัม)	ปานกลาง (420 จูล/กรัม)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบไทรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ตาหรือคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer จะศึกษาสารประกอบทั้งสองชนิดนี้

2.2 กากของเสียอุตสาหกรรม

เนื่องด้วยประเทศไทยมีการเติบโตด้านอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีปริมาณกากของเสียจากอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นตลอดเวลา กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้เริ่มการจัดการของเสียอุตสาหกรรม เนื่องมาจากการออกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 พ.ศ. 2531 กำหนดให้ผู้ประกอบการมีหน้าที่ต้องรวบรวม และจัดการสิ่งปฏิกูลหรือของเสียอุตสาหกรรม

2.2.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม

กากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึงของเหลือทิ้งจากการกระบวนการผลิต หรือในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมไม่ต้องการใช้อีกต่อไป ซึ่งกากของเสียดังกล่าวอาจยังมีคุณสมบัติหรือความเข้มข้นในระดับที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม หรืออาจเป็นกากของเสียที่ไม่ก่อให้เกิด สามารถแบ่งประเภทได้เป็น

1. กากของเสียอันตราย (Hazardous waste) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 กำหนดลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตราย คือ สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารไวไฟ สารกัดกร่อน สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย สารมีลักษณะความเป็นพิษ สารที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ (กรมโรงงานฯ, 2549)

2. กากของเสียไม่อันตราย (Non-Hazardous waste) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม อุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 กำหนดลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นของเสียอันตราย คือ สารที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) น้อยกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ จัดเป็นของเสียที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย สามารถนำกากของเสียนั้นกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ได้ (กรมโรงงานฯ, 2549)

2.2.2 อนุสัญญาบาเซล

อนุสัญญาบาเซล เป็นอนุสัญญาว่าด้วยการควบคุมการเคลื่อนย้ายข้ามแดนของของเสียอันตรายและการกำจัด (Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal) เพื่อกำหนดข้อตกลงระหว่างประเทศในการควบคุมการนำเข้า การส่งออก การนำผ่าน พร้อมทั้งการจัดการของเสียอันตรายให้มีความปลอดภัย อีกทั้งเป็นการป้องกันการขนส่งที่ผิดกฎหมาย สำหรับประเทศไทยได้ให้สัตยาบันเป็นภาคีสมาชิกอนุสัญญาบาเซล เมื่อ พ.ศ.2540 และมีผลบังคับใช้กับประเทศไทยใน พ.ศ.2541 ตามข้อกำหนดของอนุสัญญาบาเซล ได้แบ่งบัญชีรายชื่อของเสียเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. List A เป็นของเสียที่ควบคุมมีประมาณ 59 ชนิด ได้แก่
   - ของเสียประเภทโลหะ 18 ชนิด เช่น สารหนู ตะกั่ว ปรอท แร่ใยหิน แคดเมียม
   - ของเสียประเภทอนินทรียสาร 6 ชนิด เช่น สารเร่งปฏิกิริยาฟลูออลีน

- ของเสียประเภทอินทรียสาร 19 ชนิด เช่น น้ำมันดิบ น้ำมันเตา

- ของเสียอื่น ๆ 16 ชนิด เช่น ของเสียจากโรงพยาบาล วัตถุระเบิด

2. List B เป็นของเสียไม่อันตราย เช่น เศษแก้ว ทองแดง กระดาษ ชิ้นส่วน อุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งเป็นของเสียไม่อันตรายนั้นได้รับการยกเว้นให้มีการเคลื่อนย้ายเพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์หรือใช้ใหม่ได้

ส่วนผลประโยชน์จากการเข้าร่วมเป็นภาคีอนุสัญญาบาเซล คือ

1. สามารถป้องกันปัญหาการลักลอบนำของเสียมาทิ้งในประเทศ จากกลุ่มประเทศภาคีสมาชิก เนื่องจากอนุสัญญาบาเซลฯ กำหนดมาตรการบังคับให้ประเทศภาคีผู้ส่งออก รับผิดชอบในการนำกลับ หรือชดเชยค่าเสียหายที่เกิดขึ้น และกำหนดให้เป็นการขนส่งที่ผิดกฎหมาย

2. การปฏิบัติตามข้อกำหนดของอนุสัญญาบาเซลฯ จะทำให้ทราบล่วงหน้า หากมีการนำเข้า นำผ่าน และส่งออกของเสียอันตราย

3. การเข้าร่วมเป็นภาคีสมาชิก ทำให้ต้องมีการกำหนดมาตรการ และระเบียบปฏิบัติในการควบคุมการส่งออก การนำเข้า และการนำผ่านของเสียอันตราย รวมทั้งการจัดหาอุปกรณ์สถานที่กำจัดของเสียอันตรายภายในประเทศ

4. ได้รับสิทธิในการส่งออกของเสียอันตราย ไปกำจัดในประเทศภาคีซึ่งมีเทคโนโลยีที่เหมาะสม และมีความสามารถในการกำจัดของเสียอันตราย

5. สามารถค้าขายกับประเทศภาคี ในการส่งออก และนำเข้าของเสียอันตราย เพื่อการอุตสาหกรรมที่ใช้ของเสียอันตรายเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต

6. จะได้รับความคุ้มครอง และความช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการ และด้านการเงิน จากกองทุนหมุนเวียน เพื่อแก้ไขปัญหากรณีเกิดอุบัติเหตุ เนื่องมาจากการขนส่ง เคลื่อนย้าย และกำจัดของเสียอันตราย

7. จะได้รับความช่วยเหลือด้านวิชาการ และเทคโนโลยีต่างๆ จากประเทศภาคีที่พัฒนาแล้ว เพื่อปรับปรุง แก้ไข ปัญหาการจัดการของเสียอันตรายภายในประเทศ

อนุสัญญาบาเซลไม่ได้เป็นเพียงมาตรการด้านกฎหมายเท่านั้น แต่ยังเป็นเครื่องมือและกลไกที่ทำให้เกิดการพัฒนาการจัดการของเสียอันตรายของประเทศภาคสมาชิกให้อยู่ในระดับสากล และควบคุมการค้าขายกากของเสียอันตรายให้เป็นระบบมากขึ้น และช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อมจากของเสียอันตรายอีกด้วย (สำนักสนธิสัญญาและยุทธศาสตร์, 2548)

2.2.3 การจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม

การจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการบำบัดของเสีย เช่น การทำเสถียร การทำให้เป็นกลาง กระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง การนำเอาของเสียมาใช้

ประโยชน์ใหม่ เป็นต้น แนวโน้มการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรมมีการเปลี่ยนแปลงไป นอกจากการบำบัดของเสียตามวิธีต่างๆ แล้วยังมีการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรมโดยการเผาในกลุ่มของโรงปูนซีเมนต์

2.2.3.1 **ประเภทของกากของเสียอุตสาหกรรมที่เหมาะสมและที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเผากำจัดในเตาผลิตปูนซีเมนต์** (ธีระพล ติรวศิน, 2546)

1. กากของเสียจากอุตสาหกรรมที่เหมาะสำหรับการเผากำจัดในเตาผลิตปูนซีเมนต์
   1.1 กากของเสียที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ
   1.2 กากของเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ
   1.3 น้ำเสียเข้มข้นสูงซึ่งไม่สามารถกำจัดโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสีย
   1.4 กากของเสียที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ได้
2. กากของเสียจากอุตสาหกรรมที่ไม่เหมาะสำหรับการเผากำจัดในเตาผลิตปูนซีเมนต์
   2.1 กากของเสียที่มีการกัดกร่อนสูง เช่น กรดเข้มข้น
   2.2 สารกัมมันตรังสี
   2.3 ขยะติดเชื้อ
   2.4 กากของเสียที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงเกินกว่าเกณฑ์กำหนด
   2.5 กากของเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงเกินกว่าเกณฑ์กำหนด

2.3 ทบทวนงานวิจัยการนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ข้อมูลที่จะกล่าวต่อไปนี้ รวบรวมมาจากงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตซีเมนต์เมื่อมีการนำกากอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักมาใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็น และสามารถมองเห็นภาพรวมเกี่ยวกับงานวิจัย

2.3.1 ความหมายของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน

วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนที่นำมาใช้จะเป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมและสิ่งปฏิกูล เช่น เถ้าลอยและเถ้าหนัก อิฐทนไฟที่หมดอายุการใช้งานแล้ว สุขภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ยางรถยนต์เก่า เชื้อเพลิงสังเคราะห์ น้ำมันเก่าที่ใช้แล้ว รวมทั้งดินที่ปนเปื้อนน้ำมัน สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

ทั้งนี้ข้อจำกัดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่นำมาใช้ทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ คือ จะต้องไม่มีการปนเปื้อนของสารที่เป็นอันตราย เช่น พีซีบี (PCBs – Polychlorinated Biphenyls) วัสดุติดเชื้อจากโรงพยาบาล รวมทั้งขยะครัวเรือนทั่วไปที่ยังไม่ผ่านการคัดแยก เป็นต้น สำหรับการปนเปื้อนประเภทอื่น ๆ เช่น คลอรีน ซัลเฟอร์ และโลหะหนักนั้น มีเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนที่

ยอมรับได้สำหรับสารแต่ละชนิดไว้ โดยเกณฑ์ที่กำหนดนี้ได้รับการเห็นชอบและผ่านการรับรองจากหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง

อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักถึง คือ ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงทดแทนจะต้องมีความเหมาะสม คือจะต้องควบคุมอุณหภูมิความร้อนในการเผาปูนเม็ดให้คงที่ เพื่อให้ได้ปูนเม็ดที่มีส่วนผสมทั้งหมดรวมเป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงทดแทนจะต้องไม่เป็นอุปสรรคต่อการทำงานของเตาเผาปูนซีเมนต์ด้วยเช่นกัน

การนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้เพื่อทดแทนวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในการผลิตปูนซีเมนต์นั้นมีข้อพึงระวังที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ จะต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและความปลอดภัยของพนักงานตลอดจนถึงคุณภาพสิ่งแวดล้อมของชุมชนในท้องถิ่น โดยจะต้องมีการจัดการดูแลและควบคุมอย่างเหมาะสม (จุมพล เลิศชูวงศา, 2546)

2.3.2 การใช้ประโยชน์จากกากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์

ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำกากของเสียอุตสาหกรรมจากแหล่งต่างๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน หรือแม้แต่เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีของเสียหลายชนิดที่มีความสามารถในการเผาไหม้ได้ดีและให้พลังงานสูง ทำให้มีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ เมื่อรวมเหตุผลด้านการจัดการที่ดีควบคู่ไปกับหลักเศรษฐศาสตร์อุตสาหกรรมเพื่อเป็นการลดต้นทุนด้านการผลิต อีกทั้งยังสามารถกำจัดของเสียได้ สิ่งที่ได้คือ การนำของเสียที่สามารถเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนได้มาเผาร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมานานกว่า 20 ปีแล้ว (Achternbosch และคณะ, 2003)

สำหรับเชื้อเพลิงทดแทนนั้นพบได้หลายรูปแบบ อาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว ของเสียจากชุมชน หรือกากจากอุตสาหกรรม ซึ่งมีการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนมากกว่า 10 ปีแล้ว การใช้ของเสียในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์มีเพิ่มมากขึ้นในหลายประเทศ ตัวอย่างเช่น ในระหว่างปี 1990 ถึง 1998 มีการใช้เชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ของประเทศต่างๆ เป็นสัดส่วนดังนี้คือ เบลเยียมร้อยละ 18 ฝรั่งเศสร้อยละ 52.4 สวิสเซอร์แลนด์ ร้อยละ 25 อังกฤษร้อยละ 20 และเยอรมนีร้อยละ 15 (Mokrzycki และ Bochenczyk, 2003)

ถึงแม้ว่ากฎหมายในสหรัฐอเมริกา กำหนดของเสียที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ควรให้พลังงานเพียง 5,000 Btu ต่อหนึ่งปอนด์เท่านั้น แต่เชื้อเพลิงจากของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมโดยทั่วไป สามารถให้พลังงานได้สูงกว่าถึง 10000 Btu ต่อหนึ่งปอนด์ (Environmental Toxicology International, 1992) ทำให้แนวโน้มการใช้เชื้อเพลิงทดแทน เพิ่มขึ้นในตลาดพลังงานทั่วโลก โดยปกติแล้วเชื้อเพลิงทดแทนจะมีการตรวจสอบและควบคุมของเสียที่เข้ามา โดยมีสมบัติที่ควรพิจารณาก่อนการนำไปใช้ในการเผาร่วมกับกระบวนการผลิตซีเมนต์

ได้แก่ สถานะทางกายภาพ ปริมาณสารที่มี ความเป็นพิษ ส่วนประกอบของสารที่ระเหยได้ง่าย ค่าพลังงานความร้อน สมบัติการบดได้ ปริมาณความชื้น และความเหมาะสมของเทคโนโลยีที่ใช้ (Mokrzycki และ Bochenczyk, 2003)

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปชนิดของกากของเสียอุตสาหกรรมที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างกากของเสียอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Environmental Toxicology International, 1992; Trezza และ Scian, 2000; Achternbosch และคณะ, 2003; Ract, Espinosa และ Tenorio, 2003; Shih, Chang และ Chiang, 2003)

ชนิด	วัตถุที่ใช้
วัตถุดิบทดแทน	แร่เหล็ก ทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ เถ้าหนัก เถ้าลอยจากถ่านหิน วัสดุจากการผลิตเหล็ก เถ้าจากการเผาน้ำมันรถยนต์เก่าที่ใช้แล้ว กัลวานิคสลัดจ์จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า
เชื้อเพลิงทดแทน	เศษไม้ ตัวทำละลาย ของเสียพวกน้ำมัน ยางรถยนต์เก่า เชื้อเพลิงจากการผลิตขยะอุตสาหกรรมเฉพาะ เชื้อเพลิงทดแทนจากขยะชุมชน ขยะกระดาษ ขยะพลาสติก ส่วนผสมในกระดาษและพลาสติก วัสดุรถยนต์ วัสดุสิ่งทอ สารอินทรีย์ที่ใช้แล้ว เนื้อสัตว์และอาหารสัตว์

การใช้ประโยชน์จากกากของเสียอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมีการนำไปใช้จริงในหลายประเทศ เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถจัดการของเสียได้อย่างเหมาะสม และเป็นการใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงานที่มีอย่างคุ้มค่ามากที่สุดอีกด้วยดังแสดงในตารางที่ 2.5 และ 2.6 ซึ่งเป็นสัดส่วนการใช้ประโยชน์จากของเสียเพื่อเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนี เมื่อปี 1999

ตารางที่ 2.5 ปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนีปี 1999 (Achternbosch และคณะ, 2003)

วัตถุดิบที่ป้อน		ปริมาณที่ป้อนสำหรับการผลิตปูนเม็ด (ตัน/ปี)
วัตถุดิบหลัก	หินปูน	35,695,913
	ดินเหนียวปนปูน	10,000,000
	ดินเหนียวรวมกับเบนโทไนต์/คาร์โอลิไนต์	1,985,000
	ทราย	1,240,000
วัตถุดิทดแทน	วัสดุจากการผลิตเหล็ก	170,000
	แร่เหล็ก	117,000
	เถ้าจากกระบวนการเผา	240,000
	เถ้าลอยจากถ่านหิน	212,039
	ทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ	140,000

ตารางที่ 2.6 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนีปี 1999 (Achternbosch และคณะ, 2003)

เชื้อเพลิงที่ป้อน		ปริมาณที่ป้อนสำหรับการผลิตปูนเม็ด (ตัน/ปี)
เชื้อเพลิงหลัก	ถ่านหินแข็ง (Hard Coal)	980,000
	ถ่านหินสีน้ำตาล (Brown Coal)	2,140,000
	ถ่านโค้กน้ำมัน (Oil Coke)	312,903
เชื้อเพลิงทดแทน	ยางรถยนต์เก่า (Used Tire)	236,000
	น้ำมันที่ทิ้งแล้ว (Waste Oil)	181,000
	เศษไม้ (Scrap Wood)	77,000
	สัดส่วนของเสียจากการค้า ชุมชน และอุตสาหกรรม	290,000

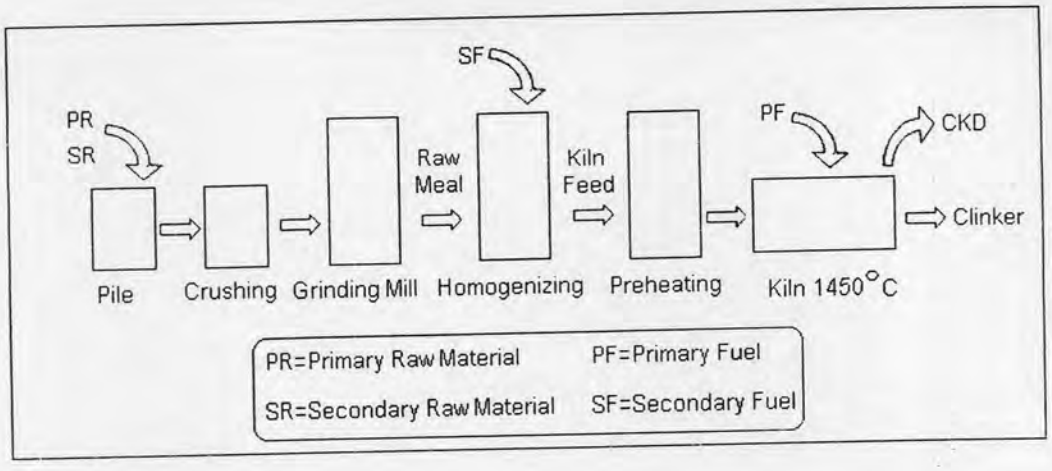
2.3.3 การใช้ประโยชน์จากกากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

สำหรับการนำกากอุตสาหกรรมมาใช้ร่วมในการผลิตซีเมนต์นั้น บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) มีความสามารถในการรองรับกากของเสียต่างๆ ได้ในปริมาณสูง ตัวอย่างของเสียที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ได้แก่ ยางรถยนต์เก่า เศษไม้ น้ำมันเก่าที่ใช้แล้ว สารทำละลายที่ใช้แล้ว ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี แต่กากของเสียที่ใช้นั้นต้องไม่มีส่วนประกอบของสารอันตรายเช่น พีซีบี (Polychlorinated Biphenyls: PCBs) ของเสียจากโรงพยาบาลที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น วัสดุที่มีการกัดกร่อนสูง เป็นกรดเข้มข้น กากกัมมันตภาพรังสี และของเสียที่เป็นอันตรายทางชีววิทยาที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น เป็นต้น

เชื้อเพลิงทดแทนที่เข้ามาส่วนใหญ่มักเป็นกากของเสียในรูปของแข็ง เช่น กากข้าวโพดและแกลบ มีปริมาณประมาณ 10-20 ตันต่อวัน นอกจากนี้ยังมีกากลิกไนต์ และส่วนผสมของกากอาหารสัตว์อีกด้วย ส่วนเชื้อเพลิงหลักซึ่งคือถ่านหินและลิกไนต์มีปริมาณประมาณ 1,000 ตันต่อวัน และเชื้อเพลิง Calciner ประกอบด้วยลิกไนต์และถ่านหินเช่นกัน แต่สัดส่วนของถ่านหินน้อยกว่า ซึ่งใช้ในขั้นตอนการอบความร้อนก่อนเข้าสู่เตาเผา

แนวโน้มในการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) มีสูงขึ้นในแต่ละปี เช่น ปี 1998 มีปริมาณการใช้ประมาณ 0.01 ล้านตัน ในปี 2000 มีปริมาณการใช้ประมาณ 0.02 ล้านตัน และในปี 2001 มีปริมาณการใช้ประมาณ 0.20 ล้านตัน

สำหรับวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและทดแทนมีการป้อนเข้าสู่กระบวนการในสามจุดด้วยกัน จุดแรกคือกองวัตถุดิบก่อนการย่อยขนาดเป็นชิ้นเล็กๆ (Pile) จะมีการเติมวัตถุดิบหลักและวัตถุดิบทดแทน เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา เถ้าลอยและเถ้าหนักในจุดนี้ ก่อนการบดละเอียดเป็นผงฝุ่นในหม้อบดขนาดใหญ่ (Grinding Mill) จุดที่สองคือขั้นการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันในไซโลผสมวัตถุดิบ (Homogenizing Silo) จะมีการเติมเชื้อเพลิงทดแทนในจุดนี้ และจุดที่สามคือในเตาเผา (Kiln) จะมีการเติมเชื้อเพลิงหลัก ซึ่งทางฝ่ายตรวจสอบคุณภาพของทางบริษัทจะมีการสุ่มตรวจตัวอย่างชั่วโมงละ 1 ครั้งบริเวณจุดต่างๆของกระบวนการผลิตเพื่อตรวจสอบให้ได้ตามมาตรฐาน จุดที่มีการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลัก (Primary) และทดแทน (Secondary) เข้าสู่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รายละเอียดจุดที่มีการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลัก และทดแทนเข้าสู่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

2.3.4 องค์ประกอบภายในของกากของเสียอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

แนวคิดที่จะนำกากของเสียจากอุตสาหกรรม เข้าสู่กระบวนการเผาในเตาเผาร่วมกับกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นเตาเผาที่ใช้อุณหภูมิสูง และสามารถใช้ประโยชน์จากกากอุตสาหกรรมนั้นเพื่อเป็นวัตถุดิบหรือเป็นเชื้อเพลิงในการเผาปูนซีเมนต์ได้ เนื่องจากกากของเสียจากอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักมีส่วนประกอบของซิลิกา แคลเซียม และอลูมินา ในปริมาณที่สูงมากพอ อันเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญในปูนซีเมนต์ (Singh, Upadhayay และ Prasad, 1996; Monshi และ Asgarani, 1999; Arjunan, Silsbee และ Roy, 1999; Singh และ Garg, 2000)

ในการดำเนินการผลิตนั้น ความเข้าใจเรื่องผลกระทบจากส่วนประกอบที่ไม่ต้องการให้มีในระบบเตาเผานั้นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกี่ยวข้องได้ ตัวอย่างคือ ของเสียที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ หรือไตรคลอโรเบนซีน ถ้ามีการนำมาเผาร่วมในเตาเผาปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปจะเกิดไฮโดรเจนคลอไรด์ขึ้น ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นกรดสามารถทำปฏิกิริยากับโปตัสเซียมออกไซด์และโซเดียมออกไซด์ในเตาเผา เกิดเป็นเกลือของอัลคาไลน์ เกลือที่ระเหยได้เหล่านี้จะไปกลั่นตัวในส่วนที่เตาเย็นลง ถ้าของเสียมีความเข้มข้นของคลอไรด์ผสมอยู่มากก็อาจเกิดเกลือเหล่านี้ขึ้นในปริมาณที่สูง และสุดท้ายสามารถเข้าไปขัดขวางในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ ดังนั้นของเสียที่มีคลอไรด์เป็นส่วนผสมอยู่นั้น จะต้องผ่านการตรวจสอบอย่างเข้มงวดจากฝ่ายการผลิตซีเมนต์ในโรงงานเสียก่อน (Achternbosch และคณะ, 2003)

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบภายในของของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมบางชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

กาก อุตสาหกรรม	น้ำหนักของ ส่วนประกอบพื้นฐาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำหนักของ ส่วนประกอบอื่นๆ	ร้อยละ สูงสุดที่ เติมได้	อ้างอิง
เถ้าจากการเผาน้ำมันรถยนต์เก่าที่ใช้แล้ว	CaO= 21.34 SiO_2 = 3.80 Al_2O_3 = 1.64 Fe_2O_3= 2.32	MnO = ร้อยละ 13.35 TiO_2 = ร้อยละ 0.04 Ba = 158 มก./กก. Cr = 737 มก./กก. Cu = 1,426 มก./กก. Pb = 23,632 มก./กก. Sn = 390 มก./กก. Sr = 214 มก./กก. Zn = 114,483 มก./กก.	-	Trezza และ Scian, 2000
กัลวานิคสลัดจ์จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า	Ca = 43.19 Si = 9.02 Al = 2.33 Fe = 1.88	Cu = ร้อยละ 2.41 Ni = ร้อยละ 1.22 Sr = ร้อยละ 0.21 Cr = ร้อยละ 0.14 Sn = ร้อยละ 0.12	ร้อยละ 2	Ract, Espinosa และ Tenório, 2003
เถ้าจากเตาเผาขยะชุมชน	CaO = 27.2 SiO_2 = 29.4 Al_2O_3 = 18.0 Fe_2O_3= 13.3	MgO = ร้อยละ 1.6 Na_2O = ร้อยละ 3.6 K_2O = ร้อยละ 0.9	< ร้อยละ 5	Shih,Chang และ Chiang, 2003
สลัดจ์จากโรงชุบโลหะ	CaO = 26.0 SiO_2 = 6.3 Al_2O_3 = 4.3 Fe_2O_3= 35.0	K_2O = ร้อยละ 0.24 MnO = ร้อยละ 0.41 Ba = 575 มก./กก. Cd = 1,030 มก./กก. Cr = 41,700 มก./กก. Cu = 96,300 มก./กก. Ni = 62,400 มก./กก. Pb = 5,290 มก./กก. Zn = 227,000 มก./กก.	-	Stegemanna และ Buenfeld 2003

ตารางที่ 2.7 จะเห็นว่าของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีองค์ประกอบของ CaO SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งเป็นออกไซด์หลักเช่นเดียวกับในปูนซีเมนต์ จึงมีศักยภาพสูงและมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้งานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ดี แต่สิ่งสำคัญที่สุดข้อหนึ่งที่ควรคำนึงถึงก่อนที่จะมีการใช้ของเสียเหล่านี้ คือ ต้องแน่ใจว่าไม่มีส่วนประกอบที่ไม่ต้องการให้มีในของเสียมากเกินค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจไปยับยั้งคุณสมบัติหรือปฏิกิริยาที่จำเป็นบางอย่างในกระบวนการผลิตได้ อย่างไรก็ตามกากอุตสาหกรรมนั้นยังมีองค์ประกอบของโลหะที่เป็นอันตรายอยู่ด้วย ซึ่งอาจเป็นแหล่งที่มาของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ได้

1.3.5 แหล่งที่มาของโลหะหนักในปูนซีเมนต์จากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน

ในกากของเสียจากอุตสาหกรรมหลายชนิด พบว่ามีส่วนประกอบของโลหะที่เป็นอันตราย ตัวอย่างสารที่พบในกากของเสียจากอุตสาหกรรมซึ่งก่อให้เกิดอันตราย เช่น สารหนู (As) แบเรียม (Ba) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) และเงิน (Ag) เป็นต้น หากมีการนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมที่มีส่วนประกอบของโลหะหนักอยู่มาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน อาจส่งผลกระทบต่อปูนซีเมนต์ได้

Achternbosch และคณะ (2003) ได้ศึกษาถึงการถ่ายโอนของโลหะหนัก จากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและทดแทนไปสู่ซีเมนต์ โดยวิเคราะห์จากสมดุลการเข้าและออกของสารในระบบ (Material Flow) โดยกลุ่มผู้วิจัยพยายามที่จะเน้นเรื่องอิทธิพลการส่งผ่านโลหะหนักจากวัตถุแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าไปและความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดที่พบในผลิตภัณฑ์ โดยใช้แหล่งข้อมูลประมาณ 300 แหล่งด้วยกันเพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการคำนวณตามแบบจำลองในแบบบนลงล่าง (Top Down Approach)

วิธีการคิดแบบบนลงล่างนี้ใช้ในการคำนวณอิทธิพลการส่งผ่านโลหะหนักจากวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการผลิตของโรงงาน โดยไม่พิจารณาถึงความแตกต่างเรื่องระบบของโรงงานที่ทำการเก็บข้อมูล พื้นฐานวิธีคิดนี้อยู่ที่การผลิตซีเมนต์ทั้งหมดทั้งประเทศและปริมาณที่แน่นอนของวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และของเสียในปีนั้น รวมไปถึงความเข้มข้นของโลหะหนักในแต่ละส่วนด้วย จากวิธีคิดนี้กลุ่มผู้วิจัยสรุปตามลักษณะรูปแบบการกระจายตัวของโลหะหนักจากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงเข้าสู่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้เป็น 4 หมวดดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แหล่งที่มาของโลหะหนักบางชนิดจากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน (Achternbosch และคณะ, 2003)

หมวด	รายละเอียด		โลหะหนัก
หมวด 1	ปริมาณของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในปูนซีเมนต์ ได้รับอิทธิพลมาจากวัตถุดิบหลักน้อยกว่าร้อยละ 55		แคดเมียม ทองแดง สังกะสี
หมวด 2a	ปริมาณของโลหะหนักได้รับอิทธิพลมาจากวัตถุดิบหลักระหว่างร้อยละ 60-80 ส่วนปริมาณโลหะหนักที่มาจากเชื้อเพลิงจะมีอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่มาจากวัตถุดิบทดแทน	มาจากเชื้อเพลิงหลักเป็นหลัก	นิกเกิล เวเนเดียม
หมวด 2b		มาจากเชื้อเพลิงทดแทนเป็นหลัก	พลวง แทลเลียม
หมวด 3	ปริมาณของโลหะหนักได้รับอิทธิพลมาจากวัตถุดิบหลักประมาณร้อยละ 70 ส่วนปริมาณโลหะหนักที่มาจากวัตถุดิบทดแทนจะมีอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่มาจากเชื้อเพลิง		โคบอลต์ โครเมียม
หมวด 4	ปริมาณของโลหะหนักได้รับอิทธิพลมาจากวัตถุดิบหลักประมาณร้อยละ 75 โดยปริมาณโลหะหนักที่มาจากเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน		สารหนู ตะกั่ว ดีบุก

หมวดที่ 1สำหรับสังกะสี ทองแดงและแคดเมียม วัตถุดิบหลักมีอิทธิพลในการส่งผ่านโลหะหนักนี้ในปริมาณไม่ถึงครึ่งหนึ่งของปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในซีเมนต์ โดยวัตถุดิบที่สำคัญที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาคือกากจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ส่วนเชื้อเพลิงทดแทนที่สำคัญคือ ยางที่ใช้แล้ว น้ำมันที่ทิ้งแล้ว และส่วนที่เป็นขยะชุมชนและกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

หมวดที่ 2 สำหรับพลวง แทลเลียม นิกเกิล และเวเนเดียม วัตถุดิบหลักจะส่งผ่านโลหะหนักนี้ประมาณร้อยละ 60 และร้อยละ 74 ของความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดในปูนซีเมนต์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน สำหรับพลวงนั้นมาจากเชื้อเพลิงทดแทนที่สำคัญคือ ยางที่ใช้แล้ว และส่วนที่เป็นขยะชุมชนและกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับเวเนเดียมมาจากเชื้อเพลิงที่สำคัญคือถ่านหินน้ำมัน

หมวดที่ 3 สำหรับโคบอลต์และโครเมียม นอกจากวัตถุดิบหลักแล้ว วัตถุดิบทดแทนก็มีอิทธิพลอย่างมากที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน จากการทบทวนเอกสารพบว่าการใช้กากอุตสาหกรรม

จากอุตสาหกรรมเหล็กและเถ้าลอยจากถ่านหินก่อให้เกิดการส่งผ่านโคบอลต์เข้าไปในซีเมนต์ ส่วนโครเมียมเกิดการใช้กากอุตสาหกรรมจากอุตสาหกรรมเหล็กและเถ้าจากกระบวนการเผาไหม้เป็นปัจจัยหลัก

หมวดที่ 4 สำหรับการส่งผ่านโลหะของสารหนูตะกั่ว และดีบุกมีที่มาจากเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในปริมาณที่เกือบเท่ากัน วัตถุดิบทดแทนที่สำคัญมาจากการใช้กากอุตสาหกรรมจากอุตสาหกรรมเหล็กและเถ้าลอยจากถ่านหินเป็นหลัก

แม้ว่าการวิเคราะห์ตามวิธีของ Achternbosch และคณะ (2003) สามารถทำให้เข้าใจถึงการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและทดแทนไปยังปูนซีเมนต์ แต่ไม่อาจสรุปได้ว่าเป็นการศึกษาที่ครบถ้วนสมบูรณ์ ปัญหาที่สำคัญคือประเด็นความน่าเชื่อถือของกระบวนการวิเคราะห์เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อสรุปของการศึกษาเกี่ยวกับสถานภาพของโลหะหนักในการผลิตซีเมนต์ เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ตามวิธีของ Achternbosch นั้นมาจากการค้นคว้าข้อมูลในอินเทอร์เน็ต บทความทางวิชาการ บทความเกี่ยวกับของเสียอันตราย วิทยานิพนธ์ทั้งระดับปริญญาเอกและปริญญาโท รายงานจากหน่วยงานภาครัฐ และการสัมภาษณ์ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านอุตสาหกรรมเหล็กและการนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นที่น่าเสียดายที่มีเพียงไม่กี่ข้อมูลเท่านั้นที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์โดยตรง ทำให้ประเด็นนี้กระทบความน่าเชื่อถือของข้อสรุปที่ได้อย่างมาก

แม้จะเห็นได้ชัดว่าวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลักเป็นส่วนสำคัญที่สุดถึงที่มาของโลหะหนัก แต่วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนที่ป้อนสู่ระบบก็เป็นตัวที่ก่อให้เกิดโลหะหนักในซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญได้เช่นกัน และยังมีความแตกต่างกันของโลหะหนักที่พบอีกด้วยซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ชนิดของกากของเสียจากอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์และโลหะที่เกี่ยวข้อง (Achternbosch และคณะ, 2003)

โลหะ	เชื้อเพลิงทดแทน	วัตถุดิบทดแทน
สารหนู		เถ้าลอยจากถ่านหิน ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก
แคดเมียม	ยางที่ใช้แล้ว สัดส่วนจากของเสียชุมชน ของเสียทางการค้า และของเสียอุตสาหกรรม	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก
โคบอลต์	ยางที่ใช้แล้ว	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก เถ้าลอย และทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ
โครเมียม	ยางที่ใช้แล้ว	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก เถ้าจากกระบวนการเผา
ทองแดง	สัดส่วนจากของเสียชุมชน ของเสียทางการค้า และของเสียอุตสาหกรรม	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก เถ้าลอยจากถ่านหิน
นิกเกิล		ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก เถ้าลอยจากถ่านหิน
ตะกั่ว	ยางที่ใช้แล้ว ของเสียประเภทน้ำมัน	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก เถ้าลอยจากถ่านหิน
พลวง	ยางที่ใช้แล้ว สัดส่วนจากของเสียชุมชน ของเสียทางการค้า และของเสียอุตสาหกรรม	
ดีบุก		ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก
แทลเลียม	ยางที่ใช้แล้ว	เถ้าลอยจากถ่านหิน
เวเนเดียม		เถ้าลอยจากถ่านหิน
สังกะสี	ยางที่ใช้แล้ว ของเสียประเภทน้ำมัน	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก

2.3.6 การกระจายตัวของโลหะหนักในผลิตภัณฑ์ซีเมนต์

การนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมที่มีส่วนประกอบของโลหะหนักอยู่มาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ องค์ประกอบที่เป็นโลหะหนักที่ไม่สามารถเผาทำลายได้ มีแนวโน้มที่จะกระจายตัวไปอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์คือ ฝุ่นปูนซีเมนต์ หรือไปรวมอยู่กับปูนเม็ด หรือแม้กระทั่งอยู่ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายของซีเมนต์ (Trezza และ Scian, 2000)

จากการทบทวนงานวิจัยหลายชิ้นพบว่ามีการศึกษาการกระจายตัวของโลหะหนักในซีเมนต์และฝุ่นปูนจากการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ชนิดของโลหะ	ปริมาณโลหะที่อยู่ในปูนเม็ด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อ้างอิง	หมายเหตุ
แคดเมียม	51 22	Sprung, 1985 Murat และ Sorrentino,1996	
โครเมียม	99 84	Sprung, 1985 Murat และ Sorrentino, 1996	ใช้ $CrCl_3$ ในการวิจัย
ทองแดง	99.3	Ract, Espinosa และ Tenorio, 2003	
นิกเกิล	97	Sprung, 1985	
ตะกั่ว	37.1 25	Andrade และคณะ, 2003 Sprung และ Rechenberg, 1994	ใช้ $Pb(NO_3)_2$ ในการวิจัย ใช้ $PbCl_2$ ในการวิจัย เป็นที่ทราบกันว่าตะกั่วมีการสูญหายออกไปเนื่องจากการระเหยที่อุณหภูมิ 750° C โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีปริมาณของคลอไรด์อยู่ด้วย ทำให้ตะกั่วยึดติดกับปูนเม็ดในปริมาณต่ำ
เวเนเดียม	69.6	Andrade และคณะ, 2003	ใช้ NH_4VO_3 ในการวิจัย
สังกะสี	53 86 75	Murat และ Sorrentino, 1996 Andrade และคณะ, 2003 Caponero และ Tenorio, 2000	ใช้ ZnO ในการวิจัย

การงานวิจัยในตารางที่ 2.10 ทั้งหมดเป็นการทดลองด้วยเตาไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิในการสังเคราะห์ซีเมนต์ ทำให้คาดว่าการทดลองในกลุ่มนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าในเตาเผาจริง เพราะสามารถแยกความเข้มข้นของโลหพหนักแต่ละชิดได้ นอกจากนี้ในการผลิตซีเมนต์จำลองที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ มีความเป็นไปได้ที่จะได้รับตัวอย่างที่เป็นตัวแทนที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ได้จากเตาเผาจริง แต่ยังมีข้อบกพร่องบางประการซึ่งอาจลดความน่าเชื่อถือของการทดลองกลุ่มนี้ลง อย่างแรกคือ ซีเมนต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากการจำลองการเผานั้นโดยทั่วไปจะดำเนินการเผาในเบ้าหลอมที่ทำจากทองคำขาว (Platinum crucible) ซึ่งการผสมระหว่างวัตถุดิบและของเสียที่ประกอบด้วยโลหะจะเกิดการผสมไม่สมบูรณ์เหมือนกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงในเตาเผาแบบหมุน ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่สำคัญของการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

นอกจากนี้การทดลองส่วนใหญ่จะใช้เกลือของโลหะ เช่น เกลือไนเตรตของโลหะ เกลือคลอไรด์ของโลหะ และเกลือออกไซด์ของโลหะ แทนการใช้ของเสียจริงที่อาจมีสมบัติทางกายภาพและเคมีแตกต่างไป จึงไม่น่าเชื่อเท่ากับการเผาปูนซีเมนต์ร่วมกับของเสียจริงในเตาเผาจริง อีกทั้งสังเกตว่างานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดดังสรุปในตารางที่ 2.10 นั้น ไม่สามารถอ้างได้ว่าเป็นการศึกษาการกระจายตัวของโลหะหนักในซีเมนต์ที่สมบูรณ์แบบ ดังจะเห็นได้จากไม่มีงานวิจัยใดในตารางที่รายงานถึงการรวมตัวของโลหะหนักในฝุ่นปูนอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากข้อจำกัดของการทดลองเองที่มีการสังเคราะห์ตัวอย่างซีเมนต์จากการเผาเกลือของโลหะกับวัตถุดิบในเตาไฟฟ้า ซึ่งทำให้เป็นไปได้ยากที่จะมีการศึกษาการรวมตัวกันของโลหะในฝุ่นปูนในระบบนั้นได้ และร้อยละการรวมตัวของโลหะแต่ละตัวดังตารางที่ 2.10 ก็ไม่อาจยืนยันได้ถึงร้อยละของโลหะหนักว่ายังคงเป็นเช่นเดิมหรือมีการเปลี่ยนแปลงไป

Portland Cement Association ได้ทำการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ตัวอย่างซีเมนต์จากเตาเผาจริงของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ 97 แห่งในอเมริกาเหนือ ที่มีการใช้เชื้อเพลิงทั้งที่เป็นของเสียอันตรายและไม่เป็นของเสียอันตราย อาจสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการรวมตัวและความเข้มข้นของโลหะในซีเมนต์นั้นประกอบด้วย ประเภทของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผา การออกแบบระบบ และการดำเนินการศึกษา (Environmental Toxicology International, 1992) ดังแสดงในตารางที่ 2.11 แสดงถึงความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์จากเตาเผาจริง

ตารางที่ 2.11 ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์จากเตาเผาจริง (Environmental Toxicology International, 1992)

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ (มก./กก.)		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
พลวง	2.4	0.7	4
สารหนู	19	5	71
แบเรียม	280	91	1420
เบริลเลียม	1.1	0.3	3.1
แคดเมียม	0.34	0.03	1.12
โครเมียม	76	25	422
ตะกั่ว	11	1	75
ปรอท	0.01409	0.00005	0.039
นิกเกิล	31	10	129
เซเลเนียม	1.42	0.62	2.23
เงิน	9.2	6.75	19.9
แทลเลียม	1.08	0.01	2.68

นอกจากนี้มีการรายงานความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูน แสดงดังตารางที่ 2.12 จากหน่วยงานที่ศึกษาเรื่องเหมืองแร่ของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Bureau of Mines) ทำการสำรวจความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูนจากเตาเผาจริงของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ในปี 1982 และ Portland Cement Association ทำการสำรวจในปี 1991 จากการตรวจสอบค่าสูงสุดของความเข้มข้นของโลหะในฝุ่นปูน สรุปว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อความเข้มข้นสูงๆ นี้คือกรณีที่มีการหมุนเวียนปริมาณของฝุ่นปูนกลับมาใช้ซ้ำในเตาเผา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของโลหะที่สามารถระเหยได้สูงอยู่ด้วย เช่น แคดเมียม ตะกั่ว เซเลเนียม และแทลเลียม และมีการหมุนเวียนเฉพาะในส่วนที่เป็นฝุ่นปูนเท่านั้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะโดยเฉลี่ยระหว่างค่าจากทั้งสองสถาบัน ในปีที่แตกต่างกัน จะสังเกตได้ว่าข้อมูลทั้งสองไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าแม้กระบวนการผลิต เชื้อเพลิง และวัตถุดิบของแต่ละโรงงานจะมีความแตกต่างกันก็ตาม

แต่ค่าความเข้มข้นของโลหะที่พบในฝุ่นปูนค่อนข้างจะคงที่ (Environmental Toxicology International, 1992)

ตารางที่ 2.12 ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูนจากเตาเผาจริง สำรวจเมื่อปี1982 และปี 1991 (Environmental Toxicology International, 1992)

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูน (มก./กก.)					
	ปี1991			ปี 1982		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
พลวง	2	0.3	3.4	7.5	<1.6	70
สารหนู	18	2	159	24	1.3	518
แบเรียม	172	35	767	-	<55	<55
เบริลเลียม	0.65	0.13	3.54	-	<2	<2
แคดเมียม	10.3	0.1	59.6	23	<1.5	352
โครเมียม	41	8	293	42	11	172
ตะกั่ว	360	34	7390	264	<26	1750
ปรอท	0.66	0.004	25.5	0.52	<0.13	1.0
นิกเกิล	22	1	60	30	<12	91
เซเลเนียม	28.14	2.68	307	-	-	-
เงิน	10.53	4.8	40.7	8.3	<3	17
แทลเลียม	43.24	1.4	776	-	<60	185

Sprung (1985) ชี้ว่าการกระจายตัวของโลหะระหว่างในปูนเม็ด และฝุ่นปูนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะที่ป้อนเข้าสู่เตาเผา ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ และกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามแต่ละปัจจัยที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อสถานภาพของโลหะ จะแปรเปลี่ยนไปตามแต่ละธาตุ ตัวอย่างคือ การกระจายตัวของตะกั่วในซีเมนต์ขึ้นอยู่กับทั้งกระบวนการผลิตและปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ ในทางตรงกันข้าม Sprung ได้แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของสังกะสีนั้นไม่ค่อยมีความสัมพันธ์ต่อทั้งกระบวนการผลิตและปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ และจะมีการยึดติดอยู่กับปูนเม็ดในปริมาณสูง Sprung ยังค้นพบว่าสารหนู โครเมียม และนิกเกิลมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายกับสังกะสีอีกด้วย

Environmental Toxicology International (1992) รายงานว่ามีการยึดติดของแทลเลียมอยู่กับปูนเม็ดประมาณร้อยละ 10 และมีการยึดติดของปรอทอยู่กับปูนเม็ดประมาณร้อยละ 39 อันเนื่องจากความสามารถในการระเหยได้สูงของโลหะกลุ่มนี้นั่นเอง ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยคือให้มี

การตรวจวัดวัตถุที่เข้าระบบอย่างเข้มงวดก่อนจะมีการเติมโลหะเหล่านี้เข้าสู่เตาเผา และให้มีการศึกษาเรื่องพฤติกรรมของโลหะเหล่านี้เพิ่มเติมต่อไป

ถึงแม้ผลการศึกษาจากงานวิจัยในเตาเผาจริงจะมีความน่าเชื่อถืออยู่มาก แต่เงื่อนไขของการเผาจริงแฝงปัญหาสำคัญซึ่งทำให้ไม่สามารถช่วยให้ความกระจ่างของอิทธิพลของของเสียแต่ละตัวต่อความเข้มข้นของโลหะในซีเมนต์ได้

จากการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา ลักษณะการทดลองมีทั้งกลุ่มที่คำนวณตามแบบจำลอง กลุ่มที่ทำการศึกษาโดยใช้เตาไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการเป็นหลัก และกลุ่มที่สามได้มาจากการทดลองในเตาเผาจริงของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ทั้งสามกลุ่มนี้มีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน แต่ก็เป็นงานวิจัยที่ช่วยให้เกิดการพัฒนาในการศึกษาในด้านนี้ต่อไป ตารางที่ 2.13 สรุปข้อดีและข้อเสียของแต่ละกลุ่มของงานวิจัย

ตารางที่ 2.13 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของงานวิจัยทั้งสามกลุ่มที่ต่างกัน

ชนิดของการทดลอง	ข้อดี	ข้อเสีย
การทดลองเผาซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการโดยใช้เตาไฟฟ้า	1. ควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ 2. ใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยและเป็นตัวแทนได้ดี 3. สามารถปรับเปลี่ยนสูตรการเผาได้โดยง่าย	1. ไม่สามารถที่จะทำให้ผสมกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างวัตถุดิบกับโลหะเหมือนในเตาของจริง 2. การทดลองส่วนใหญ่ใช้เกลือโลหะ เช่น ออกไซด์ของโลหะแทนการใช้ของเสียจริง 3. การเผาในเตาไฟฟ้าไม่สามารถศึกษาองค์ประกอบของโลหะใน CKD ได้
การคำนวณตามแบบจำลอง	1. สามารถแยกแยะของเสียแต่ละตัวที่ปนอยู่ในซีเมนต์ได้	1. ไม่น่าเชื่อถือ 2. ไม่ได้คำนึงถึงความแตกต่างระหว่างแต่ละ Plant ทำให้ยังไม่สามารถรับรองได้
การทดลองในเตาเผาจริง	1. เป็นกระบวนการจริง 2. เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจริง	1. ไม่สามารถแยกความเข้มข้นของสารแต่ละตัวออกจากกันได้

2.3.8 สถานภาพของโลหะหนักในการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เพื่อให้เข้าใจภาพรวมของสถานภาพของโลหะหนักในระบบซีเมนต์ จึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างซีเมนต์และโลหะหนัก ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ การดูดติด (Sorption) การตกผลึก (Precipitation) การรวมตัวเข้ากับโครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ (Lattice Inclusion) และการเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบในซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ (Compounds) ที่ละลายน้ำได้จำกัด (Li และคณะ, 2001)

พฤติกรรมของโลหะในระบบซีเมนต์ทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความแตกต่างกันทำให้ปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับซีเมนต์มีความแตกต่างกันด้วย และมีอิทธิพลอย่างมากไม่ใช่เพียงแค่ในเรื่องคุณภาพและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังมีผลต่อเนื่องไปยังอีกหลายประเด็นที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น โลหะหนักที่เสถียรเมื่อมีการรวมเข้ากับเม็ดปูนซีเมนต์ ผลในด้านคุณภาพและคุณสมบัติจะไม่หยุดแค่ในขั้นก่อนทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีผลต่อไปถึงหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์อีกด้วย ในทำนองเดียวกันโลหะหนักที่เสถียรเมื่อมีการรวมตัวเข้ากับซีเมนต์หลังปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ผลในด้านคุณภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการชะละลายของซีเมนต์ จะไม่เกิดขึ้นแค่ขณะช่วงอายุการใช้งานเท่านั้นแต่ยังสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการรื้อถอนทำลายอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการศึกษาสถานภาพที่สมบูรณ์ของโลหะหนักเป็นหัวข้อที่น่าสนใจที่นำไปสู่แง่มุมสำคัญอื่นๆ เพื่อช่วยให้สามารถหลีกเลี่ยงผลเสียที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างคาดไม่ถึง ที่อาจส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์ที่ออกมา รวมถึงคุณภาพชีวิตของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับกลไกการรวมตัวของโลหะในเม็ดปูนซีเมนต์อันเนื่องมาจากการเผาร่วมผ่านมาพบว่า มีเพียงความเข้าใจในบางแง่มุมเกี่ยวกับพฤติกรรมของธาตุเวเนเดียม สังกะสี และตะกั่วที่มาจากงานของ Andrade, Maringoro และ Kihara (2003) ซึ่งแสดงแนวโน้มในการรวมตัวของโลหะเหล่านี้ในสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นผลึกรูปแบบต่างๆ ในซีเมนต์ โดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนไมโครโพรบ (EPMA) และกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการศึกษานี้ซีเมนต์ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยให้มีโลหะปนเปื้อนอยู่คือ V_2O_5 ร้อยละ 0.78 ZnO ร้อยละ 1 และ PbO ร้อยละ 0.67 เพื่อเลียนแบบกระบวนการเผาร่วมที่มีเวเนเดียมในระบบโดยมีที่มาจากถ่านหินและ สังกะสีจากของเสียที่ไม่มีสารอันตราย และตะกั่วจากเชื้อเพลิงและกากอุตสาหกรรมตามลำดับ มีการตรวจสอบองค์ประกอบของ C_3S และ C_2S ในซีเมนต์ที่สังเคราะห์ขึ้นกับโลหะหนักที่เติมเข้าไปโดยเครื่องอิเล็กตรอนไมโครโพรบ และมีการเปรียบเทียบกับส่วนที่มีการควบคุมที่มีการใช้วัตถุดิบชนิดเดียวกันด้วย ผลการวิจัยพบว่าการส่งผ่านของเวเนเดียมมีลักษณะชอบที่จะอยู่กับ C_2S มากกว่าที่จะอยู่กับ C_3S ส่วนทั้งสังกะสีและตะกั่วแสดงแนวโน้มการส่งผ่านที่ตรงกันข้ามโดยมีลักษณะชอบที่จะอยู่กับ C_3S มากกว่าที่จะอยู่กับ C_2S

2.3.9 **ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์**

การนำกากอุตสาหกรรมมาเผาร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้น เป็นที่ทราบกันดีว่ากากอุตสาหกรรมส่วนมากมักมีโลหะหนักปะปนอยู่ ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่ออกมา รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชน จึงต้องมีการศึกษาผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์ และคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้จากการนำกากอุตสาหกรรมเหล่านี้มาใช้

ตารางที่ 2.14 ลักษณะผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์ (Siam City Cement Public Company Limited, 2005)

ลักษณะผลกระทบต่อปูนซีเมนต์	**ชนิดของโลหะหนัก**
การก่อตัวช้าลง	Pb, Zn, As, Cu, Cd, F
เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว	Cr, Ni, ฮาโลเจน
ลดความแข็งแรงในช่วงแรก	Zn, Pb, P, B, Mg
ปรับปรุงความแข็งแรงในระยะแรก	Cr, Ni, V, Ba, F
มีอิทธิพลต่อสีของปูน	Cr, Mg, Ti, Co, V

Dalton และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากโลหะแต่ละชนิดที่มีต่อปูนซีเมนต์เมื่อมีการนำกากอุตสาหกรรมเผาร่วมในกระบวนการผลิต เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไปภายใต้อุณหภูมิสูงทำให้ส่งผลกระทบที่แตกต่างกันต่อปูนซีเมนต์ด้วย

ตารางที่ 2.15 ผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์ (Dalton และคณะ, 2004)

ชนิดของโลหะ	**สมบัติและผลกระทบต่อปูนซีเมนต์**
สารหนู	โดยทั่วไปจะเข้าไปอยู่ในปูนเม็ด แต่ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์
แคดเมียม	ความเข้มข้นของแคดเมียมในปูนเม็ดจะลดลงเมื่อมีปริมาณคลอไรด์ในเตาเผาเพิ่มขึ้น
โครเมียม	สามารถลดอุณหภูมิของการก่อตัว C_3S ได้ถ้ามีปริมาณมากกว่าร้อยละ 3 มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในปูนเม็ด โดยจะเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณของโลหะสูงกว่า (ร้อยละ 2.5-5โดยน้ำหนัก) ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาทั่วไป

ตารางที่ 2.15(ต่อ) ผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์ (Dalton และคณะ, 2004)

ชนิดของโลหะ	สมบัติและผลกระทบต่อปูนซีเมนต์
ทองแดง	ผลกระทบมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับรูปที่ก่อตัวขึ้น (ออกไซด์ เกลือ หรือ ซัลไฟด์)
ตะกั่ว	เป็นโลหะที่ระเหยได้ และสามารถสะสมในปูนเม็ดโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบ หากมีปริมาณน้อยกว่า 70 ส่วนในล้านส่วน
ปรอท	เป็นโลหะที่ระเหยได้ง่ายมากและคาดว่ามีการหลุดออกไปกับก๊าซทางปล่องควัน ส่วนความรู้เรื่องผลกระทบต่อการผลิตปูนเม็ดยังไม่มีการศึกษาที่เพียงพอ
สังกะสี	ความแตกต่างของรูปที่ก่อตัวขึ้น สามารถก่อให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกัน เช่น เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนของปูนเม็ด และลดความสามารถในการบดได้ มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในปูนเม็ด โดยจะเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณของโลหะสูงกว่า (ร้อยละ 2.5-5โดยน้ำหนัก) ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาทั่วไป
เวเนเดียม	เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนของปูนเม็ด และลดความสามารถในการบดได้

1.4 ตะกรัน (Slag)

2.4.1 ความหมายของตะกรัน

ในกระบวนการถลุงแร่นอกจากจะได้โลหะออกมาแล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นที่ไม่ถูกลดออกซิเจนเป็นโลหะ ส่วนประกอบดังกล่าวจะรวมตัวกันเป็นตะกรัน เพราะฉะนั้นตะกรันจึงเป็นส่วนผสมของพวกโลหะออกไซด์ ซิลิเกต และอาจมีพวกซัลไฟด์ คาร์ไบด์หรือเฮไลด์เป็นส่วนประกอบด้วย ตะกรันควรมีจุดหลอมตัว ความถ่วงจำเพาะ และความหนืดต่ำๆ เพื่อให้เม็ดโลหะแยกตัวออกได้เร็ว โดยไม่ติดค้างในตะกรัน และเพื่อให้ตะกรันเหลวพอที่จะไหลออกจากเตาถลุงได้สะดวก ส่วนประกอบตะกรันมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการเก็บโลหะด้วย ในการถลุงแร่จึงต้องผสมสารเชื้อในวัตถุประสงค์เพื่อให้ส่วนผสมของตะกรันมีคุณสมบัติตามต้องการ

ตะกรันที่ออกมาจากเตาหลอมจะอยู่ในลักษณะของเหลวก่อนและต่อมาถูกทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ ในอากาศ ตะกรันที่ได้จะมีลักษณะเป็นผลึกที่แน่น เรียกว่า Air-cooled slag แต่ถ้าตะกรันเหลวถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการฉีดน้ำ ตะกรันที่ได้จะมีผลึกที่เบากว่า เรียกว่า Granulated slag (วิริยา เทวนุกูล, 2546; Shi และ Qian 2000)

2.4.2 ประเภทของตะกรัน

2.4.2.1 ตะกรันกลุ่มเหล็ก (Ferrous slag)

ตะกรันกลุ่มเหล็ก เช่น ตะกรันเหล็ก (Iron slag) ตะกรันเหล็กกล้า (Steel slag) ตะกรันเหล็กกล้าผสม (Alloy steel slag) และตะกรันโลหะผสมของเหล็กกับธาตุอื่น (Ferroalloy Slag) เป็นต้น การเกาะยึดของโลหะในตะกรันกลุ่มเหล็กจะมีความแข็งแรงมาก และไม่ถูกชะละลายออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย จึงไม่นิยมนำไปสกัดเอาโลหะมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง แต่นิยมนำตะกรันประเภทนี้มาใช้ประโยชน์ในงานโยธา งานผลิตซีเมนต์ ใช้ถมที่ หรือใช้เป็นวัสดุปกคลุมหลุมฝังกลบ เป็นต้น (Shen และ Forssberg, 2003)

2.4.2.2 ตะกรันนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous slag)

ตะกรันนอกกลุ่มเหล็ก เช่น ตะกรันทองแดง ตะกรันตะกั่ว และตะกรันดีบุก เป็นต้น โดยทั่วไปตะกรันประเภทนี้จะมีโลหะหนัก หรือแร่ธาตุที่เป็นพิษ หากมีอยู่ในปริมาณสูงก็สามารถปนเปื้อนและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ จึงนิยมนำมาสกัดโลหะต่างๆออกมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง (Manz และ Castro, 1997; Shen และ Forssberg, 2003)

2.4.2.3 ตะกรันจากการเผาขยะ (Incineration slag)

ถึงแม้ว่าตะกรันกลุ่มนี้จะมาจากการเผาขยะชุมชนก็ตาม แต่ก็มีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง ในประเทศเยอรมัน และประเทศญี่ปุ่น จึงมีการนำตะกรันจากการเผาขยะมาสกัดเอาโลหะหนักออกมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Sakai และ Hiraoka, 2000)

2.5 ตะกรันทองแดง (Copper slag)

ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้ประโยชน์และมีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรมเป็นที่สองรองจากเหล็ก เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงใช้ทำอุปกรณ์เครื่องถ่ายเทความร้อน เช่น ทำเครื่องควบแน่น (Condenser) หอกลั่น นอกจากนี้ ทองแดงมีสภาพต้านทาน (Resistively) ต่ำเป็นที่สองรองจากเงิน จึงเป็นสื่อไฟฟ้าอย่างดี ปริมาณทองแดงจำนวนมากกว่าครึ่งหนึ่งที่ผลิตได้ในโลกใช้ในกิจการอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ทำสายไฟฟ้า ลวดที่ใช้ในกิจการไฟฟ้าและใช้เป็นสื่อนำความร้อน ทองแดงเป็นโลหะที่ทนต่อการสึกกร่อนตามธรรมชาติได้ดีมาก

ในกระบวนการถลุงแร่ทองแดงมาใช้ประโยชน์ นอกจากจะได้โลหะทองแดงออกมาแล้วก่อให้เกิดตะกรันทองแดงตามมาอีกด้วย ดังนั้นตะกรันทองแดงซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากโรงงานผลิตทองแดงจากการถลุงแร่ทองแดงจึงจัดเป็นของเสียอุตสาหกรรมชนิดหนึ่ง ตามอนุสัญญาบาเซลตะกรันทองแดงจัดอยู่ในของเสีย List B ซึ่งเป็นของเสียไม่อันตราย สามารถยกเว้นให้มีการเคลื่อนย้ายเพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์หรือใช้ใหม่ได้

2.5.1 **ความหมายและแหล่งกำเนิด**

การถลุงแร่ทองแดง ทำโดยเอาสินแร่ที่ขุดได้มาร่อนแยกดินทรายออกก่อนที่จะนำไปถลุงในเตาถลุง และตัวเปลี่ยนทองแดง (Copper converter) ตามลำดับ แร่ทองแดงชนิดซัลไฟด์จะต้องแยกไปย่างต่างหากเสียก่อน เพื่อลดปริมาณกำมะถันก่อนเอาไปเข้าเตาถลุง ในเตาถลุงเหล็กแร่ทองแดงจะเปลี่ยนรูปไปเป็นออกไซด์ของทองแดงและหลอมรวมตัวกัน เรียกว่า แมตที (Matte) จากนั้นนำแมตทีหลอมเหลวไปเข้าตัวเปลี่ยน (Converter) และพ่นลมเข้าไปในตัวเปลี่ยน เพื่อให้ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับเหล็กและกำมะถัน ซึ่งเป็นสารเจือปนกลายเป็นกากหรือตะกรัน และเพื่อให้ออกไซด์ของทองแดงทำปฏิกิริยากับทองแดงซัลไฟด์เหลือเป็นทองแดงอย่างเดียว ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี 2 สภาวะคือ โลหะทองแดงที่มีส่วนผสมแร่ซัลไฟด์สูงจะอยู่ในรูปของซัลไฟด์ และตะกรันที่อยู่ในรูปออกไซด์ (Gorai, Jana และ Premchand, 2003)

ในแต่ละปีจะมีปริมาณของตะกรันนี้เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตทองแดงทั่วโลกประมาณ 24.6 ล้านตัน โดยในภูมิภาคเอเชียมีการผลิตตะกรันทองแดงสูงสุดถึง 7.26 ล้านตันต่อปี ดังตารางที่ 2.16 แสดงปริมาณตะกรันทองแดงที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคของโลก

ตารางที่ 2.16 ปริมาณตะกรันทองแดงที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคของโลก (Gorai, Jana และ Premchand, 2003)

ภูมิภาค	**ปริมาณของตะกรันทองแดง** (Copper slag) **ต่อปี (ล้านตัน)**
เอเชีย	7.26
อเมริกาเหนือ	5.90
ยุโรป	5.56
อเมริกาใต้	4.18
แอฟริกา	1.23
โอเซียนเนีย	0.45

โดยตะกรันที่มีปริมาณของทองแดงเหลืออยู่น้อยกว่าร้อยละ 0.8 จะถูกนำไปทิ้งเป็นของเสีย ปริมาณตะกรันทองแดงที่มากนี้ไม่สามารถทำการกำจัดโดยการฝังได้ทั้งหมด เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ฝังกลบ และมีโอกาสชะละลายของโลหะหนักออกมาปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

2.5.2 การนำตะกรันทองแดงมาใช้ประโยชน์

จากปริมาณของตะกรันทองแดงที่เกิดขึ้นมากในแต่ละปี จึงมีแนวคิดในการจัดการกับตะกรันที่เกิดขึ้น โดยการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพราะการกำจัดตะกรันทองแดงด้วยการทิ้งเป็นการสูญเสียมูลค่าของโลหะหนักไปโดยเปล่าประโยชน์และอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมตามมาได้ ทั้งนี้การนำตะกรันทองแดงไปใช้ประโยชน์จะแตกต่างกันไปตามชนิดของตะกรัน จึงได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำตะกรันทองแดงมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการกล่าวถึงการนำการนำตะกรันทองแดงมาใช้ประโยชน์ดังนี้

Collins และ Cielieski (1994) ศึกษาการนำของเสียมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบร่วมในการผลิตวัสดุปูพื้นถนน พบว่าคุณสมบัติที่ดีบางประการของตะกรันทองแดง โดยเฉพาะตะกรันทองแดงที่ละเอียดสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมในงานปูพื้นแอสฟัลต์

Akihiko และ Takashi (1996) ศึกษาการนำตะกรันทองแดงเป็นมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีต พบว่าที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อตะกรันต่อน้ำ ที่ 1ต่อ 2 ต่อ 0.55 ตะกรันทองแดงที่มีการบดจะช่วยให้ความความแข็งแรงของมอร์ตาสูงขึ้น ชนิดของตะกรันที่แตกต่างกันจะมีผลต่อปฏิกิริยาของมวลรวมในสภาวะที่เป็นด่าง โดยมีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม การเสียดสี ความสามารถในการเทได้ การยุบตัว การหดตัวและการแข็งตัวได้

Mobasher, Devaguptapu และArion (1996) ศึกษาการนำตะกรันทองแดงมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต และ/หรือการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ พบว่าตะกรันทองแดงสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มากกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นผลประโยชน์ที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดควบคู่ไปกับการลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์

Shen และ Forssberg (2003) ศึกษาการสกัดโลหะต่างๆจากตะกรัน พบว่าในตะกรันทองแดงส่วนใหญ่ มีปริมาณเหล็กและซิลิกาออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 25-50 มีปริมาณทองแดงอยู่ร้อยละ 0.5-3.7 นอกจากนี้ยังมีนิเกิล และโคบอลต์ แตกต่างกันไปตามแหล่งที่มาของตะกรัน จึงมีความเป็นไปได้ในการสกัดโลหะต่างๆจากตะกรันทองแดง แต่หากโลหะมีอยู่ในปริมาณที่น้อยจะไม่คุ้มค่าในการลงทุน

2.5.3 ลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดง

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าตะกรันทองแดงถูกนำไปใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้ก่อนการนำไปใช้ได้ประโยชน์บางประเภทมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดงก่อน จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการกล่าวถึงลักษณะทางกายภาพและลักษณะเชิงกลบางประการของตะกรันทองแดง ดังตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะเชิงกลบางประการ (Emery, 1986)

ลักษณะทางกายภาพและลักษณะเชิงกล	ข้อมูล
ลักษณะทั่วไป	สีดำ ใสเหมือนแก้ว มีรูพรุน (ตะกรันที่มีลักษณะผลึกที่เบามีรูพรุนมากกว่า)
ร้อยละการดูดซึม	0.13
ความหนาแน่นรวม (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)	144-162
สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครโอห์มต่อเซนติเมตร)	500
ความถ่วงจำเพาะ	2.8-3.8
ความชื้น	น้อยกว่าร้อยละ 5
ร้อยละการสูญเสียการกัดกร่อน	24.1
ร้อยละการสูญเสียความอยู่ตัวของโซเดียมซัลเฟต	0.9
มุมของแรงเสียดทานภายใน	40-53

การศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะเชิงกลบางประการของตะกรันทองแดงจากหงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ตะกรันทองแดงที่มีลักษณะเป็นผลึกแน่น (Air-Cooled Copper Slag) จะมีสีดำ ใสเหมือนแก้ว ความถ่วงจำเพาะจะมีค่าแปรผันตามปริมาณของเหล็ก ตั้งแต่ 2.8 จนถึง 3.8 สำหรับค่าหน่วยน้ำหนักของตะกรันค่อนข้างจะสูงกว่าวัสดุมวลคละทั่วๆไป ความสามารถในการดูดซึมค่อนข้างต่ำ

ส่วนตะกรันทองแดงที่มีลักษณะผลึกที่เบา (Granulated Copper Slag) จะมีรูพรุนมากกว่า ทำให้มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่า แต่มีความสามารถในการดูดซึมสูงกว่าตะกรันทองแดงที่มีลักษณะเป็นผลึกแน่น ตะกรันทองแดงที่มีลักษณะผลึกที่เบามีรูปร่างของอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมที่สม่ำเสมอกันโดยทั่วไปมีขนาดอยู่ระหว่าง 4.75 และ 0.075 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถผ่านรูตะแกรงเบอร์ 200 ได้ ตะกรันทองแดงทั้งสองชนิดมีลักษณะเชิงกลที่ดีสำหรับการใช้เป็นวัสดุมวลคละ มีคุณสมบัติของความอยู่ตัว (Soundness) ที่ดี มีความต้านทานต่อการเสียดสีและมีความทนทานจากแรงเสียดทานสูงเนื่องจากรูปร่างของอนุภาคเป็นมุมแหลม (Emery, 1986)

สำหรับค่าความละเอียดของตะกรัน ทำการศึกษาโดย Al-Jabri และคณะ (2005) พบว่าตะกรันมีความละเอียด 1261 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

2.5.4 ลักษณะทางเคมีของตะกรันทองแดง

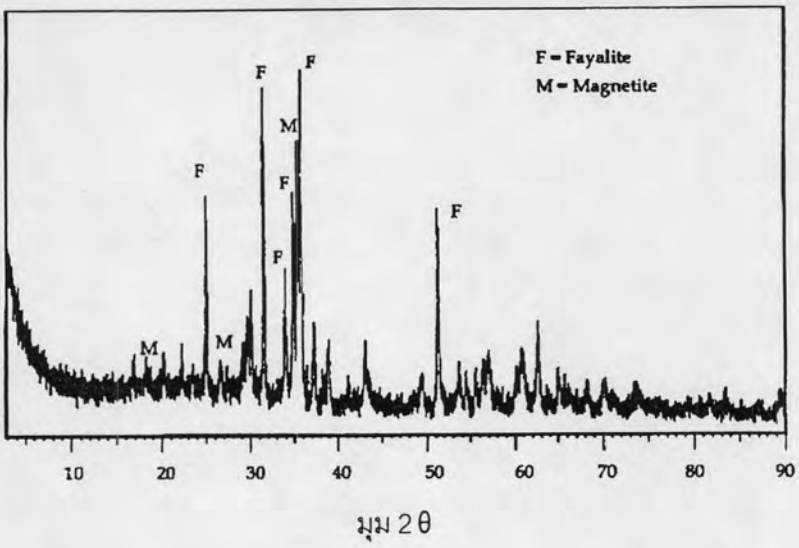
เนื่องจากตะกรันทองแดงที่มีแหล่งกำเนิดต่างกัน กรรมวิธีการผลิตที่ต่างกันจะส่งผลถึงความแตกต่างกันของลักษณะทางเคมีของตะกรัน จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการกล่าวถึงลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดงดังนี้

Mobasher, Devaguptapu และArion (1996) ได้รวบรวมข้อมูลการศึกษาลักษณะทางเคมีของตะกรันทองแดงจากหลายแหล่งที่มา พบว่าในตะกรันทองแดงมีองค์ประกอบของ FeO SiO_2 Al_2O_3 และ CaO เป็นส่วนใหญ่ และมีปริมาณของทองแดงเพียงร้อยละ 1 ถึง 2 เท่านั้น แสดงดังตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงจากหลายแหล่งที่มา (Mobasher, Devaguptapu และArion,1996)

องค์ประกอบทางเคมี	แหล่งที่มา					
	Copper Queen	Detroit	Prince	Old Dominion	United Verde	Bisbee
Cu	2.1	-	1.64	-	0.18	0.32
CuO	-	-	-	3.76	2.59	-
SiO_2	24.7	34.34	27.16	27.23	35.79	28
FeO	44.8	32.27	34.62	51.3	37.89	29
MnO	0.4	8.05	0.49	1.65	-	-
CaO	10.9	10.13	17.42	5.14	12.98	9
MgO	1.7	2.3	3.51	2.54	0.75	
Al_2O_3	15.6	11.64	14.7	5.22	8.29	27
S	0.28	-	0.33	-	-	-
$CaO+SiO_2+FeO$	85.1	78.25	76.38	83.75	81.97	84

นอกจากนี้มีการศึกษารูปแบบสารประกอบในวัสดุ ตรวจวัดด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction โดยศึกษารูปแบบสารประกอบที่มีลักษณะเป็นผลึก พบว่าตะกรันทองแดงมี Magnetite (Fe_3O_4) และ Fayalite (Fe_2SiO_4) เป็นรูปแบบหลักๆ ของตะกรัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ศึกษารูปแบบสารประกอบที่มีลักษณะเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (Mobasher, Devaguptapu และArion, 1996)

Shi และ Qian (2000) รายงานผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงที่มีวิธีถลุงโดยการหลอม พบว่าองค์ประกอบหลักในตะกรันคือ Fe มีปริมาณร้อยละ 30-40 SiO_2 มีปริมาณร้อยละ 35-40 ส่วน Al_2O_3 และ CaO มีปริมาณสูงกว่าร้อยละ 10 ดังแสดงในตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.19 องค์ประกอบของตะกรันที่เกิดจากการเตาถลุง (Shi และ Qian, 2000)

องค์ประกอบของตะกรันที่เกิดจากการหลอม	ปริมาณ (ร้อยละ)
Fe (เช่น FeO และ Fe_3O_4)	30-40
SiO_2	35-40
Al_2O_3	สูงถึง 10
CaO	สูงถึง 10

ตะกรันที่หลอมเหลวจะถูกนำออกจากเตาถลุงที่อุณหภูมิ 1000-1300 องศาเซลเซียส ถ้านำตะกรันที่หลอมเหลวมาทำให้เย็นลงทันทีโดยการฉีดน้ำ ตะกรันทองแดงที่มีได้จะมีผลึกเบาและมีลักษณะใสคล้ายแก้วเกิดขึ้น เมื่อตะกรันทองแดงที่มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ต่ำแต่มีปริมาณซิลิกาสูง จะแสดงลักษณะคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Property) หากตะกรันทองแดงมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้นจะสามารถแสดงลักษณะคุณสมบัติของซีเมนต์ (Cementitious Property) ได้ดี

I26209267

Al-Jabri และคณะ (2005) จากรายงานการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของตะกรันทองแดงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้องค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันมากคือ CaO โดยจะมีในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 63 ส่วนในตะกรันทองแดงมีอยู่เพียงร้อยละ 6.06 ตะกรันทองแดงที่มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ต่ำแต่มีปริมาณซิลิกาสูง จะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction)

ตารางที่ 2.20 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Al-Jabri และคณะ, 2005)

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 (ร้อยละ)	ตะกรันทองแดง (ร้อยละ)
SiO_2	20.85	33.05
Al_2O_3	4.78	2.97
Fe_2O_3	3.51	53.45
CaO	63.06	6.06
MgO	2.32	1.56
SO_3	2.48	1.89
K_2O	0.55	0.61
Na_2O	0.24	0.28
TiO_2	0.25	0
Mn_2O_3	0.05	0.06
Loss on ignition	1.75	0
CuO	0	0.46
$Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$	29.14	89.29

2.5.5 ผลกระทบของตะกรันทองแดงที่ใช้ในงานคอนกรีต

จากการศึกษาลักษณะทางเคมีของตะกรันทองแดงที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าตะกรันทองแดงมีองค์ประกอบหลักของ Fe SiO_2 Al_2O_3 และ CaO ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญในปูนซีเมนต์ จึงมีการประยุกต์การใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดงร่วมในงานคอนกรีต ดังที่กล่าวไปบ้างแล้วในการใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดง จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการกล่าวถึงผลกระทบของตะกรันทองแดงที่ใช้ในงานคอนกรีตดังนี้

Mobasher, Devaguptapu และArion (1996) ศึกษาการนำตะกรันทองแดงมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต และ/หรือการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ พบว่าตะกรันทองแดงสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มากกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก การทดสอบมอร์ตาที่อายุบ่ม 1 7 28 และ 90 วัน พบว่า ในช่วง 1 วัน กำลังอัดจะลดลง แต่กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากอายุบ่ม 7 วันผ่านไปจนถึงอายุบ่มที่ 90 วัน ทุกๆ อัตราส่วนที่ใช้ตะกรันทองแดงแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Akihiko และ Takashi (1996) ศึกษาการนำตะกรันทองแดงเป็นมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีต พบว่าที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อตะกรันต่อน้ำ ที่ 1ต่อ 2 ต่อ 0.55 ตะกรันทองแดงที่มีการบดจะช่วยให้ความความแข็งแรงของมอร์ตาสูงขึ้น ชนิดของตะกรันที่แตกต่างกันจะมีผลต่อปฏิกิริยาของมวลรวมในสภาวะที่เป็นด่าง โดยมีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม การเสียดสี ความสามารถในการเทได้ การยุบตัว การหดตัวและการแข็งตัวได้

Tixier, Devaguptapu และ Mobasher (1997) ทดสอบความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ตะกรันทองแดงแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry พบว่าความพรุนคาปิลารี (Capillary Porosity) จะลดลง จากการลดลงของความพรุนคาปิลารีจะทำให้โครงสร้างภายในมีความหนาแน่นขึ้น ซึ่งมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่อไปและพบว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างนัยสำคัญของกำลังอัดจนถึง 1 ปี

Zain และคณะ (2004) ศึกษาผลกระทบของตะกรันทองแดงที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบมาทำให้เสถียรเป็นก้อนแข็งร่วมกับซีเมนต์ พบว่าเมื่อใช้ตะกรันทองแดงมากกว่าร้อยละ 10 แทนที่ซีเมนต์ โลหะหนักบางตัว เช่น ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี จะไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากเมื่อเพิ่มปริมาณตะกรันทองแดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาจะลดลง

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าตะกรันทองแดงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ดีกับงานคอนกรีต เพราะมีองค์ประกอบพื้นฐานที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ แต่ทั้งนี้ในตะกรันทองแดงยังอาจมีองค์ประกอบของโลหะหนักอยู่ และหากมีในปริมาณที่มากจะส่งผลกระทบไม่ดีต่องานคอนกรีตได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของตะกรันทองแดงที่ต้องการนำมาใช้งานก่อน เพื่อลดผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นได้ การวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาทั้งลักษณะทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดงที่นำมาเผาร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ด้วย

ถึงแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาจะมีการศึกษาการนำตะกรันทองแดงมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ แต่งานวิจัยทั้งหมดเป็นการนำตะกรันทองแดงมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ไม่มีการศึกษาถึงการนำตะกรันทองแดงมาเผาร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะ

ศึกษาการนำตะกรันทองแดงมาเผาร่วมกับกระบวนการผลิตผลิตปูนซีเมนต์ โดยศึกษาลักษณะเชิงปริมาณและคุณภาพของโลหะหนักในปูนเม็ดก่อนปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งสามารถใช้เป็นพื้นฐานเพื่อเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันได้