



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความหมายของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผา ส่วนผสมต่างๆ (หินปูน หรือดินปูนขาว กับ ดินเหนียว หรือ หินดาน) จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มี ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่ เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับ ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิด ขึ้นอยู่กับความละเอียดและ ส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสม และการให้ความชื้นในขณะเริ่มแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทราย และน้ำ จะได้เป็นมอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็น ปูนก่อ สำหรับงานก่ออิฐหรือหิน หรือปูนฉาบสำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับ หิน กรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทาน คล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีต ได้แก่ ฐานราก ตอม่อ เขื่อน กำแพงกันดิน พื้นและถนน ซึ่ง เมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับพื้น หลังคา สะพาน อาคารและอื่นๆ

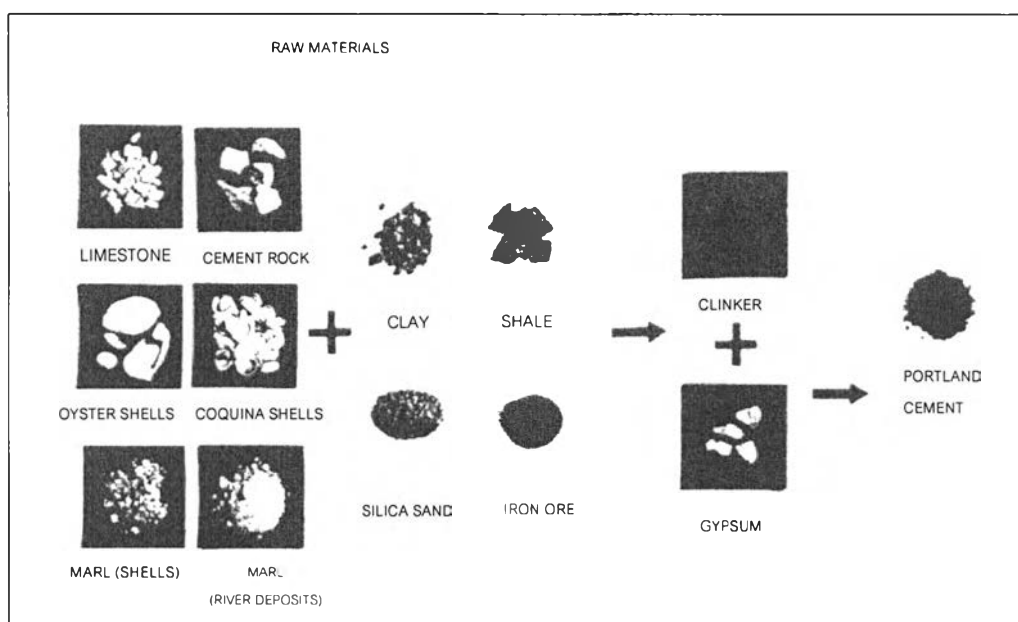
#### 2.2 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์

##### 2.2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์อาจจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous Materials) ซึ่งอยู่ในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือชอล์ก (Chalk) ดินปูนขาว (Marl)
2. ประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous Materials) ได้แก่ ดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินดำหรือดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate)

แต่ในบางครั้ง วัตถุดิบทั้งสองประเภทข้างต้นอาจมีปริมาณของธาตุที่ต้องการน้อยไป หรือมีปริมาณของธาตุอื่นเพิ่มเติมมากเกินไปจนเกินกว่าที่จำเป็น จึงจำเป็นต้องปรับส่วนผสมให้พอเหมาะเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น เพิ่มปริมาณแร่เหล็กซึ่งมีอยู่มากในศิลาแลง เมื่อหินเชลหรือดินเหนียวที่จะใช้มีปริมาณของเหล็กต่ำ หรือเติมยิปซัม (Gypsum) เพื่อใช้เป็นสารหน่วงการก่อตัวโดยผสมรวมกับปูนเม็ดจากเตาเผา เป็นต้น วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต แสดงดังรูปที่ 2.1

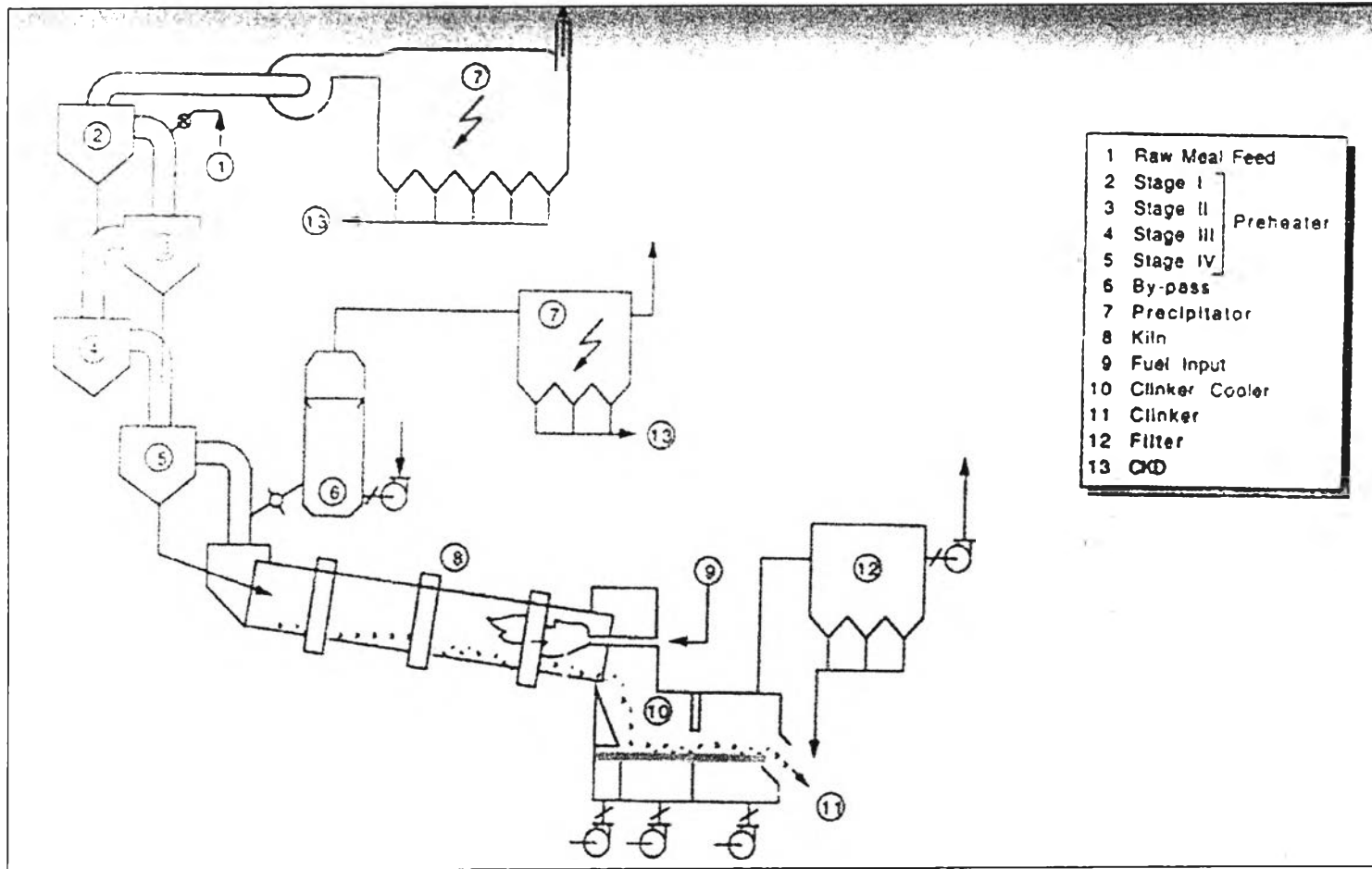


รูปที่ 2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ (วินิต, 2539)

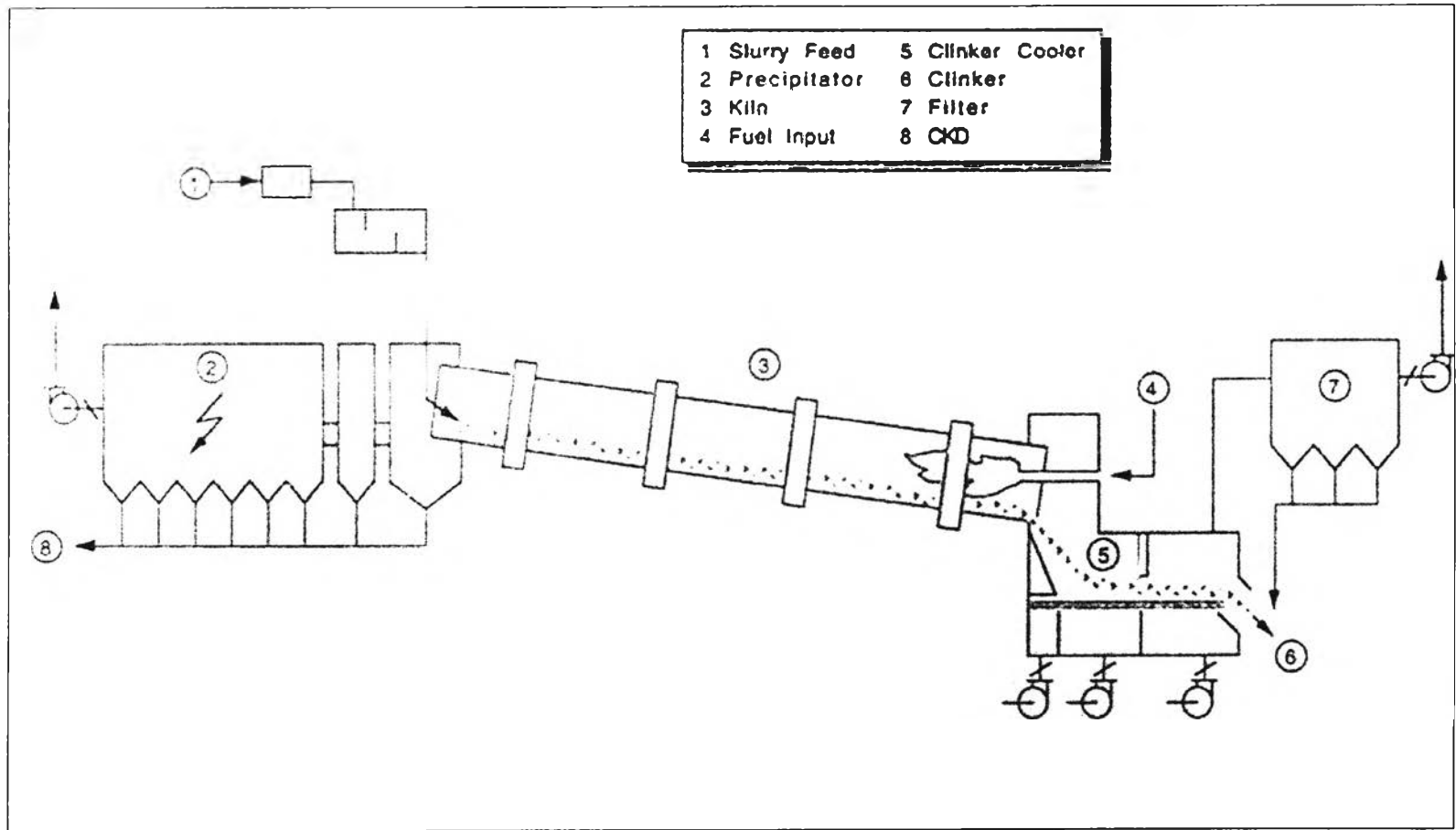
## 2.2.2 กรรมวิธีผลิตซีเมนต์โดยทั่วไป

กรรมวิธีในการผลิตอาจเป็นการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) หรือการผลิตแบบเปียก (Wet Process) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 กล่าวคือ วัตถุดิบก่อนการเผาอาจให้ผ่านกระบวนการแห้งหรือเปียก ในกระบวนการแห้ง วัตถุดิบซึ่งได้แก่ หินปูน ดินดาน แร่เหล็ก ได้รับการทำให้แห้งก่อนการบดและการผสม ส่วนในกระบวนการเปียก วัตถุดิบซึ่งได้แก่ ดินสอพอง ดินเหนียว ได้รับการบดและการผสมเปียก การเลือกกระบวนการผลิตจะต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ น้ำที่จะจ่ายให้โรงงาน ราคาของเชื้อเพลิง แหล่งกำลังไฟฟ้า วิธีเก็บฝุ่น ตลอดจนความสม่ำเสมอของวัตถุดิบก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผา ถ้าวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นหินซีเมนต์และหินปูนซึ่งแห้งตามธรรมชาติหรือมีความชื้นอยู่น้อยก็อาจทำให้แห้งก่อนโดยใช้ความร้อนที่ออกจากเตาเผาแล้วจึงนำไปบดและผสมกันในภาวะแห้งได้โดยมีราคาการผลิตต่ำซึ่งในลักษณะนี้กระบวนการผลิตแบบแห้งเสียค่าใช้จ่ายน้อย อย่างไรก็ตามถ้าส่วนผสมหนึ่งของสารผสมอยู่ในภาวะเปียก ค่าใช้จ่ายในการทำให้วัตถุดิบแห้งในกระบวนการผลิตแบบแห้งจะเพิ่มขึ้นและอาจสูงกว่าค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตแบบเปียก ในด้านการควบคุมส่วนประกอบของวัตถุดิบทางเคมี กระบวนการทั้งสองจะไม่แตกต่างกันนัก กระบวนการผลิตแบบเปียกจะซับซ้อนน้อยกว่าและเหมาะกว่า แต่ในการปรับปรุงคุณภาพและการเพิ่มชนิดของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จากวัตถุดิบที่มีอยู่ กระบวนการผลิตแบบแห้งสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียก

เมื่อนำวัตถุดิบมาบดละเอียดและผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะแล้ว ส่วนผสมนี้จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาเผา (Kiln) เตาเผาเปรียบเสมือนหัวใจของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นเครื่องจักรที่ใหญ่และแพงที่สุด ทำงานตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่มีการหยุดพัก เตาเผาส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้ใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งเป็นเหล็กกล้ามีลักษณะรูปทรงกระบอกยาวประมาณ 50 ถึง 150 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 4 เมตร ภายในบุด้วยอิฐทนไฟเพื่อเก็บความร้อนไว้ภายใน หมุนรอบตัวในแนวเอียงอย่างช้าๆ ประมาณนาทีละ 1.3 รอบ อุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ 1,400-1,600 °C วัตถุดิบที่ผสมรวมกันและถูกเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ เรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) ถูกส่งออกมาข้างนอกทางด้านล่างของเตา ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณออกไซด์หลักของธาตุต่างๆ ที่มีในปูนเม็ด ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของปริมาณทั้งหมด



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง (Dry Process) (Environmental Toxicology International, 1992)



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process) (Environmental Toxicology International, 1992)

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนออกไซด์ของธาตุต่างๆ ในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

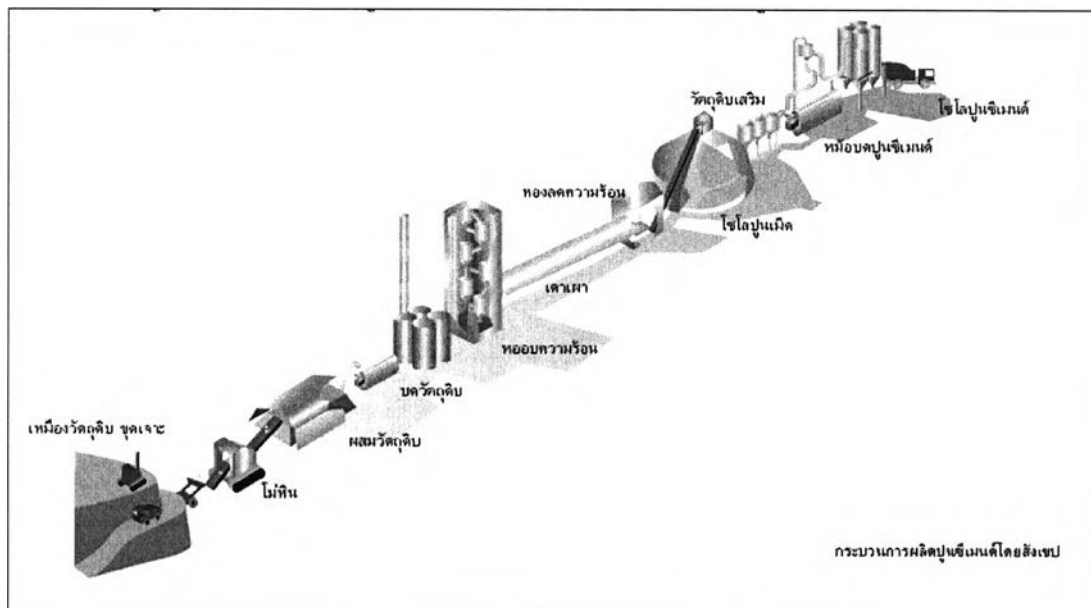
ออกไซด์ของธาตุต่างๆ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ปูนขาว (CaO)	60-65
ซิลิกา (SiO <sub>2</sub> )	20-24
อลูมินา (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4-8
เหล็ก (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2-5

สีและรูปร่างของปูนเม็ดจะบ่งถึงการเผาว่าเป็นไปอย่างถูกต้องหรือไม่ ถ้าเผาได้ที่ดีปูนเม็ดจะมีสีดำปนเขียวเหมือนแก้วใส เมื่อเย็นตัวจะแวววาวเป็นจุดๆ ก้อนใหญ่ ส่วนมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) ปูนเม็ดที่ยังเผาไม่ได้ที่จะมีสีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลเป็นหย่อมๆ ไม่เป็นมันเหมือนที่เผาได้ที่แล้ว การเผาเกินพอไม่เป็นการเสียหายแต่อย่างใด เพียงแต่สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดปูนเม็ดทั้งนี้เพราะปูนเม็ดที่เผาเกินพอมีความแข็งแรงมาก

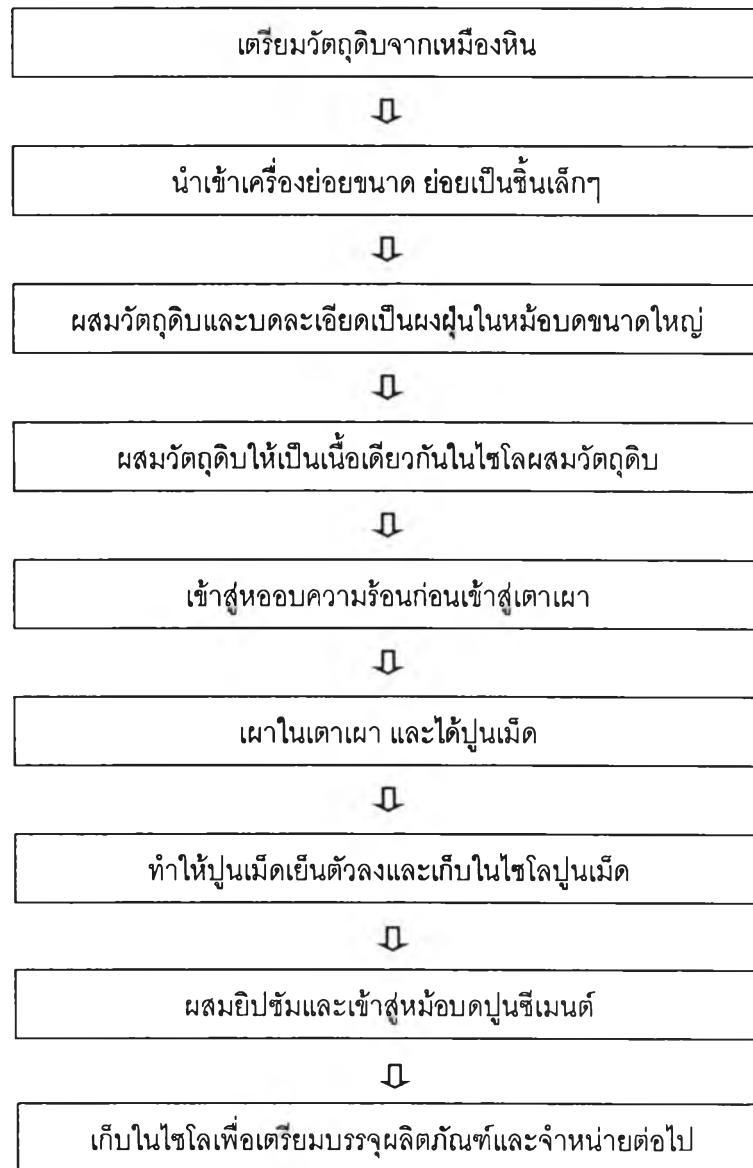
ปูนเม็ดที่ได้จากเตาเผาจะร้อนมาก ต้องได้รับการลดอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนนำไปบด การลดอุณหภูมิกระทำโดยพ่นลมหรือน้ำเข้าไปในถังลดความเย็น (Clinker Cooler) การทำให้ปูนเม็ดเย็นลงต้องมีการควบคุมอย่างดีเพราะมีผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ ถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ ความแข็งแรงในระยะหลังจะสูงขึ้น ปูนเม็ดที่เย็นตัวแล้วจะถูกนำไปบดละเอียดในหม้อบดปูน (Grinding Mill) หากปูนเม็ดมีปริมาณของยิบซัมผสมอยู่น้อย ก็ต้องใส่ยิบซัมเพิ่มเข้าไปด้วย โดยให้มีปริมาณของยิบซัมผสมรวมอยู่ประมาณร้อยละ 5 ปูนเม็ดที่บดละเอียดแล้วส่วนมากจะผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 ได้เกือบหมด การผสมยิบซัมลงไปด้วยก็เพื่อทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติก่อตัวช้าลงเมื่อผสมกับน้ำ เพราะถ้าไม่มียิบซัม เมื่อปูนซีเมนต์ได้ผสมกับน้ำจะก่อตัวเร็วเกินไป จนไม่มีเวลานานพอที่จะเอาไปเทลงแบบได้ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากกว่า จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อตัวและแข็งตัวให้กำลังรับแรงได้เร็วกว่า ส่วนปูนซีเมนต์ที่หยยาบอาจทำให้เกิดการเยิ้มหรือการคายน้ำได้มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ละเอียด ผงปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้นี้จะถูกบ่มโดยลมนำไปเก็บไว้ในถังเก็บปูนซีเมนต์ (Bulk Storage) ซึ่งเป็นถังทรงกระบอกใหญ่ตั้ง มีผนังปกคลุมมิดชิดกันความชื้น เพื่อนำไปบรรจุใส่ถุงและจำหน่ายต่อไป นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ซีเมนต์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต คือฝุ่นปูน (Cement Kiln Dust: CKD) ซึ่งเป็นอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมก๊าซขณะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งถูกดักจับโดยอุปกรณ์ดักฝุ่น

### 2.2.3 กรรมวิธีผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ตั้งอยู่ที่อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี กระบวนการผลิตนั้นเริ่มต้นจากการระเบิดหินปูน (Limestone) และหินเชล (Shale) จากเหมืองหินในเขตพื้นที่สัมปทาน ซึ่งวัตถุดิบทั้งสองชนิดนี้จะถูกนำมาเข้าเครื่องย่อยขนาดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1 กำปั้นหรือต่ำกว่า 80 มิลลิเมตร ในการผลิตปูนเม็ด 1 ตัน ต้องใช้หินปูนประมาณ 1.6 ตันซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 80 ของวัตถุดิบ หลังจากผ่านขั้นตอนของการย่อยขนาด หินที่ได้จะถูกนำมาผสมรวมกับวัตถุดิบพื้นฐานอื่นๆ เช่น แร่เหล็ก (Iron Ore) โดยจะถูกนำมาบดผสมรวมกันจนละเอียดเป็นผงฝุ่นในหม้อบดขนาดใหญ่ (Grinding Mill) จากนั้นทั้งหมดก็จะถูกผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันในไซโลผสมฝุ่นวัตถุดิบ (Homogenizing Silo) ก่อนจะถูกส่งเข้าไปยังหออบความร้อน (Preheater Tower) และไหลเข้าสู่เตาเผา หลังจากผ่านขั้นตอนของเตาเผาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าปูนเม็ด ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังห้องลดความร้อนและลำเลียงไปเก็บไว้ในไซโล สำหรับในกระบวนการขั้นสุดท้ายนั้น ปูนเม็ดจะถูกนำไปบดรวมกับยิปซัมและหินปูนในหม้อบดปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ผงตามที่ต้องการ จากนั้นจะถูกส่งไปเก็บยังไซโลเพื่อรอการบรรจุและส่งไปจำหน่ายต่อไป เตาเผาทั้ง 6 เตาในโรงงานที่จังหวัดสระบุรีมีกำลังการผลิตปูนเม็ดรวม 38,500 ตันต่อวัน รูปที่ 2.4 คือรูปจำลองกระบวนการผลิตซีเมนต์ และรูปที่ 2.5 คือแผนผังแสดงกระบวนการผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 2.4 รูปจำลองกระบวนการผลิตซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์ นครหลวง จำกัด (มหาชน) (Siam City Cement Public Company Limited, 2005)



รูปที่ 2.5 ผังกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)



ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตซีเมนต์มีสองชนิด ปฏิกิริยาแรกคือปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หินปูน (Limestone:  $\text{CaCO}_3$ ) จะถูกเผาไหม้และสลายกลายเป็น แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ตลอดทั้งการผลิตของโรงงานมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบประมาณร้อยละ 50 ก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอีกร้อยละ 40 และก๊าซจากการผลิตไฟฟ้าที่ให้กับโรงงานอีกร้อยละ 10 ปฏิกิริยาที่สองคือ ขั้นตอนของการเผาวัตถุดิบที่เตาเผา ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวของปูนเม็ด (Clinkerisation) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าสูง ประมาณ 1,450 องศาเซลเซียสขึ้นไป ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้เนื่องจากการรวมตัวของแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{Si}_2\text{O}_2$ ) อะลูมินัมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Spence, 1993)

จากอุณหภูมิที่สูงของกระบวนการผลิตและระยะเวลาในการเผา ทำให้เป็นสภาพที่สารอินทรีย์ที่อยู่ในวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงต่างๆ ซึ่งให้แก่กระบวนการเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ถ้าจากการเผาจะถูกรวมเข้ากับผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่าของเสียที่เข้าสู่กระบวนการนั้นสามารถให้ทั้งพลังงานและเป็นวัตถุดิบแก่กระบวนการได้เป็นอย่างดี การใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนยังสามารถช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ ที่ออกมาได้อีกด้วย

สำหรับการนำกากอุตสาหกรรมมาใช้ในการผลิตซีเมนต์นั้น บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) มีความสามารถในการรองรับกากของเสียต่างๆ ได้ในปริมาณสูง ตัวอย่างของเสียที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ได้แก่ ยางรถยนต์เก่า เศษไม้ น้ำมันเก่าที่ใช้แล้ว สารทำลายที่ใช้แล้ว ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี แต่กากของเสียที่ใช้นั้นต้องไม่มีส่วนประกอบของสารอันตรายเช่น พีซีบี (Polychlorinated Biphenyls: PCBs) ของเสียจากโรงพยาบาลที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น วัสดุที่มีสารไฮโดรคาร์บอนที่มีความเป็นพิษสูง กากกัมมันตภาพรังสี และของเสียที่เป็นอันตรายทางชีววิทยาที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น เป็นต้น

แนวโน้มในการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) มีสูงขึ้นในแต่ละปี เช่น ปี 1998 มีปริมาณการใช้ประมาณ 0.01 ล้านตัน ในปี 2000 มีปริมาณการใช้ประมาณ 0.02 ล้านตัน และในปี 2001 มีปริมาณการใช้ประมาณ 0.20 ล้านตัน (Siam City Cement Public Company Limited, 2005)

## 2.3 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของผลึกละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หลังจากการเผาแล้วได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite) ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งได้ให้ชื่อย่อของสารประกอบเหล่านี้ตามอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้ชื่อย่อของออกไซด์ของธาตุได้ด้วยอักษรของธาตุนั้นเพียงตัวเดียว กล่าวคือ CaO ย่อเหลือตัว C SiO<sub>2</sub> ย่อเหลือตัว S Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ย่อเหลือตัว A และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ย่อเหลือตัว F

นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบอื่นๆ อีกที่ได้หลังจากการเผา เช่น MgO TiO<sub>2</sub> Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> K<sub>2</sub>O และ Na<sub>2</sub>O ซึ่งปะปนอยู่เป็นจำนวนน้อย เมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์, 2539)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	33-55
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	15-35
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	7-15
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	5-10

### 2.3.1 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำเป็นมอร์ต้าหรือคอนกรีต คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์, 2539)

คุณสมบัติ	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
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 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาโดย X-Ray Diffraction Spectrometry จะสนใจที่จะศึกษาสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ รวมทั้งสารเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate: C-S-H) ซึ่งเป็นสารที่เกิดหลังจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานและทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม

#### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้อมูลที่จะกล่าวต่อไปนี้ รวบรวมมาจากงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตซีเมนต์เมื่อมีการนำกากอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักมาใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต จุดมุ่งหมายคือเพื่อให้ผู้อ่านทราบถึงทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็น และสามารถมองเห็นภาพรวมเกี่ยวกับงานวิจัยที่มีในปัจจุบันได้ แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของการนำข้อมูลไปใช้นั้นควรเป็นไปอย่างระมัดระวัง เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเตาเผาซีเมนต์นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ ของเสียที่ป้อนเข้าไป อุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการหลอมรวมกัน เวลาที่ใช้ ความดันของก๊าซ ชนิดของกระบวนการผลิตเช่น แบบเปียกหรือแบบแห้ง และอื่นๆ อีกมากมาย ดังนั้นผลที่สังเกตได้จากการ

เผือกากอุตสาหกรรมร่วมกับการเผาปูนซีเมนต์เมื่อจำลองสภาวะใดสภาวะหนึ่งขึ้นนั้น อาจมีความแตกต่างจากในอีกสภาวะหนึ่งได้

#### 2.4.1 การนำกากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

โดยธรรมชาติคนเรามักมีความคิดและมุมมองที่จำกัดเกี่ยวกับการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วสามารถทำได้หลายวิธี มีของเสียหลายชนิดที่มีความสามารถในการเผาไหม้ได้ดีและให้พลังงานสูง ทำให้มีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ เมื่อรวมเหตุผลด้านการจัดการที่ดีควบคู่ไปกับหลักเศรษฐศาสตร์อุตสาหกรรม สิ่งที่ได้คือ การนำของเสียที่สามารถเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนได้มาเผาพร้อมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมานานกว่า 20 ปีแล้ว (Achterbosch และคณะ, 2003) สำหรับเชื้อเพลิงทดแทนนั้นพบได้หลายรูปแบบ อาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว ของเสียจากชุมชน หรือกากจากอุตสาหกรรม ซึ่งมีการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนมากกว่า 10 ปีแล้ว และมีแนวโน้มที่จะมีการใช้เพิ่มขึ้นในตลาดพลังงานทั่วโลกอีกด้วย (Mokrzycki และ Bochenczyk, 2003) ตารางที่ 2.4 สรุปชนิดของของเสียที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างของเสียที่มักใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Environmental Toxicology International, 1992; Trezza และ Scian, 2000; Achterbosch และคณะ, 2003; Ract, Espinosa และ Tenorio, 2003; Shih และคณะ, 2003)

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

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบภายในของของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมบางชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

กากอุตสาหกรรม	น้ำหนักของส่วนประกอบพื้นฐาน	น้ำหนักของส่วนประกอบอื่นๆ	% สูงสุดในการเติมที่สามารถเป็นไปได้	อ้างอิง
เถ้าจากการเผา น้ำมันรถยนต์เก่า ที่ใช้แล้ว	CaO = 21.34% SiO <sub>2</sub> = 3.80% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 1.64% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 2.32%	MnO = 13.35% TiO <sub>2</sub> = 0.04% Ba = 158 ppm Cr = 737 ppm Cu = 1,426 ppm Pb = 23,632 ppm Sn = 390 ppm Sr = 214 ppm Zn = 114,483 ppm	-	Trezza และ Scian, 2000
กัลวานิคสลัดจ์ จากโรงงานชุบ ด้วยไฟฟ้า	Ca = 43.19% Si = 9.02% Al = 2.33% Fe = 1.88%	Cu = 2.41% Ni = 1.22% Sr = 0.21% Cr = 0.14% Sn = 0.12%	2%	Ract, Espinosa และ Tenório, 2003
เถ้าจากเตาเผา ขยะชุมชน	CaO = 27.2% SiO <sub>2</sub> = 29.4% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 18.0% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 13.3%	MgO = 1.6% Na <sub>2</sub> O = 3.6% K <sub>2</sub> O = 0.9%	< 5%	Shih และคณะ, 2003
สลัดจ์จากโรงชุบ โลหะ	CaO = 26.0% SiO <sub>2</sub> = 6.3% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 4.3% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 35.0%	K <sub>2</sub> O = 0.24% MnO = 0.41% Ba = 575 ppm Cd = 1,030 ppm Cr = 41,700 ppm Cu = 96,300 ppm Ni = 62,400 ppm Pb = 5,290 ppm Zn = 227,000 ppm	-	Stegemanna และ Buenfeldb, 2003

ตารางที่ 2.6 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนีปี 1999 (Achterbosch และคณะ, 2003)

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

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบของของเสียบางส่วนจากตารางที่ 2.4 ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าเหตุใดของเสียเหล่านี้จึงมีความสามารถและเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตซีเมนต์ได้ ซึ่งจะพบว่าของเสียเหล่านี้มีส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญต่อการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น ซิลิกา แคลเซียม และอะลูมินา ด้วยเหตุนี้การนำกากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนนั้นเป็นสิ่งที่สามารถกระทำได้และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งเป็นสัดส่วนการใช้ประโยชน์จากของเสียเพื่อเป็นวัตถุดิบหลักและทดแทนที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนี เมื่อปี 1999

ถึงแม้ว่ากฎหมายในสหรัฐอเมริกา กำหนดของเสียที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ควรให้พลังงานเพียง 5,000 Btu ต่อหนึ่งปอนด์เท่านั้น (U.S. EPA, 1991 อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992) แต่เชื้อเพลิงจากของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมโดยทั่วไป สามารถให้พลังงานได้สูงกว่าถึง 10,000 Btu ต่อหนึ่งปอนด์ (Peters และคณะ, 1986 อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992) ด้วยเหตุนี้การใช้ของเสียและกากอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 2.4 ทดแทนเชื้อเพลิงที่ใช้ตามปกติ จึงสามารถทำได้อย่างสมเหตุสมผล ในแต่ละปีมีการนำเชื้อเพลิงที่เป็นของเสียอันตรายที่มาจากหินซากพืชและซากสัตว์หรือฟอสซิล ไปเผาพร้อมกับเตาเผาปูนซีเมนต์ประมาณ 1.8 พันล้านปอนด์ (Costner และ Thronton, 1990 อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992) ตารางที่ 2.7 เป็น

สัดส่วนการใช้ประโยชน์จากของเสียเพื่อเป็นเชื้อเพลิงหลักและทดแทน ที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนี เมื่อปี 1999

ตารางที่ 2.7 สัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนเม็ดในประเทศเยอรมนีปี 1999 (Achterbosch 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 Types)	236,000
	น้ำมันที่ทิ้งแล้ว (Waste Oil)	181,000
	เศษไม้ (Scrap Wood)	77,000
	สัดส่วนของเสียจากการค้า ชุมชน และอุตสาหกรรม	290,000

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา การใช้ของเสียในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์มีเพิ่มมากขึ้นในหลายประเทศ ตัวอย่างเช่น ในระหว่างปี 1990 ถึง 1998 มีการใช้เชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ของประเทศต่างๆ เป็นสัดส่วนดังนี้คือ เบลเยียมร้อยละ 18 ฝรั่งเศสร้อยละ 52.4 สวิสเซอร์แลนด์ร้อยละ 25 อังกฤษร้อยละ 20 และเยอรมนีร้อยละ 15 (Mokrzycki และ Bochencyk, 2003) สำหรับประเทศเยอรมนีในปี 1999 จากตารางที่ 2.7 สรุปได้ว่ามีการใช้เชื้อเพลิงทดแทนประมาณร้อยละ 23 ของเชื้อเพลิงทั้งหมด และต่อมาในปี 2001 พบว่าในประเทศเยอรมนีมีการใช้เชื้อเพลิงทดแทนประมาณร้อยละ 30 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด German Cement Works Association (VDZ, 2002 อ้างถึงใน Achterbosch และคณะ, 2003) รายงานว่ายางรถยนต์เก่าจำนวน 237,000 ตัน เนื้อสัตว์ กระดูก และไขมันสัตว์จำนวน 245,000 ตัน และของเสียประเภทน้ำมันจำนวน 128,000 ตัน มีการนำไปใช้ร่วมกับขยะจากอุตสาหกรรมและขยะชุมชนอีกประมาณ

420,000 ตันในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าลักษณะการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์นั้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต

ถึงแม้ว่าของเสียหลายประเภทจะมีศักยภาพสูงและมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้งานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ดี แต่สิ่งสำคัญที่สุดข้อหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงก่อนที่จะมีการใช้ของเสียเหล่านี้ คือ ต้องแน่ใจว่าไม่มีส่วนประกอบที่ไม่ต้องการให้มีในของเสียมากเกินไปที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจไปยังยังคุณสมบัติหรือปฏิกิริยาที่จำเป็นบางอย่างในกระบวนการผลิตได้ ในการดำเนินการผลิตนั้น ความเข้าใจเรื่องผลกระทบจากส่วนประกอบที่ไม่ต้องการให้มีในระบบเตาเผาเป็นเรื่องสำคัญสำหรับการหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกี่ยวข้องได้ ตัวอย่างคือ ของเสียที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ หรือไตรคลอโรเบนซีน ถ้ามีการนำมาเผาไหม้ในเตาเผาปูนซีเมนต์โดยทั่วไปจะเกิดไฮโดรเจนคลอไรด์ขึ้น ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นกรดสามารถทำปฏิกิริยากับโปตัสเซียมออกไซด์และโซเดียมออกไซด์ในเตาเผาเกิดเป็นเกลือของอัลคาไลน์ เกลือที่ระเหยได้เหล่านี้จะปกคลุมตัวในส่วนของเตาเย็นลง ถ้าของเสียมีความเข้มข้นของคลอไรด์ผสมอยู่มาก ก็อาจเกิดเกลือเหล่านี้ขึ้นในปริมาณที่สูง และสุดท้ายสามารถเข้าไปขัดขวางในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ (Weitzman, 1983 อ้างถึงใน Achternbosch และคณะ, 2003) ดังนั้นของเสียที่มีคลอไรด์เป็นส่วนผสมอยู่นั้น จะต้องผ่านการตรวจสอบอย่างเข้มงวดจากฝ่ายการผลิตซีเมนต์ในโรงงานเสียก่อน

ในกรณีของเชื้อเพลิงทดแทน โดยปกติแล้วจะมีการตรวจสอบและควบคุมของเสียที่เข้ามาโดยมีสมบัติที่ควรพิจารณาก่อนการนำไปใช้ในการเผาร่วมกับกระบวนการผลิตซีเมนต์ ได้แก่ สถานะทางกายภาพ(ของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ) ปริมาณสารที่มี(คลอไรด์ กำมะถัน) ความเป็นพิษ(สารประกอบอินทรีย์ โลหะหนัก) ส่วนประกอบของสารที่ระเหยได้ง่าย ค่าพลังงานความร้อน สมบัติการบดได้ ปริมาณความชื้น และความเหมาะสมของเทคโนโลยีที่ใช้ (Mokrzycki และ Bochenczyk, 2003)

นอกจากสารประกอบพวกคลอรีนแล้ว ยังมีส่วนประกอบชนิดอื่นอีกเช่นกันที่ไม่ต้องการให้มีในระบบเตาเผา นั่นคือการมีสารประกอบของโลหะผสมอยู่ซึ่งอาจส่งผลที่ไม่ใช่เพียงแค่ว่าในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 2.8 เท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อคุณภาพของซีเมนต์ ซึ่งนำไปสู่ปัญหาที่เกี่ยวข้องในระยะยาวต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพของประชาชน ดังที่ได้กล่าวในบทนำถึงจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากโลหะต่อสี่ขั้นตอนที่สำคัญในวัฏจักรชีวิตของซีเมนต์นั่นคือ ผงปูนซีเมนต์ ช่วงเวลาหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน ช่วงอายุการใช้งาน และช่วงการทำลายหรือถอน สิ่งที่จะกล่าวถึงต่อไปคือการทบทวนงานวิจัยที่มุ่งเน้นในเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างโลหะกับซีเมนต์ในหลายลักษณะ



#### 2.4.2 แหล่งที่มาของโลหะหนักในการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 2.5 ถึง 2.8 สามารถให้ข้อมูลที่สนับสนุนว่าเหตุใดโลหะจึงเป็นประเด็นที่ควรได้รับความสนใจเป็นพิเศษในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้ของเสียและกากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าของเสียทั้งหมดที่โดยปกติแล้วมีการใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นมีปริมาณของโลหะประกอบอยู่ด้วยอย่างมีนัยสำคัญ และเป็นที่น่าสังเกตว่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตซีเมนต์ตามปกติก็มีปริมาณของโลหะหลายชนิดประกอบอยู่ด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้จึงไม่ใช่การกล่าวเกินความจริงที่จะสรุปว่าโลหะแม้เพียงเล็กน้อยนั้นมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการผลิตซีเมนต์ อย่างไรก็ตามสิ่งที่ได้จากตารางที่ 2.5 ถึง 2.7 ยังมีข้อจำกัดอีกมากสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตจริง เนื่องจากความเข้มข้นของโลหะในวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและเชื้อเพลิงทดแทน แปรเปลี่ยนไปตามปัจจัยหลายอย่างที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่นปัจจัยด้านธรณีวิทยาและกระบวนการที่ได้มาซึ่งของเสีย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเรื่องปกติที่ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดในของเสียที่มีการใช้ในหนึ่งอาจมีความแตกต่างกับในอีกที่หนึ่งได้แม้จะเป็นของเสียชนิดเดียวกันก็ตาม ดังนั้นการนำความเข้มข้นของโลหะดังกล่าวไปใช้กับโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ที่อื่นที่มีการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงจากของเสียมาเผาด้วยนั้นจึงไม่ใช่สิ่งที่ถูกต้องนัก

ในทางตรงข้าม สิ่งสำคัญสองสิ่งที่ยังคงเหมือนกันแม้จะอยู่ในสถานที่ต่างกันคือพฤติกรรม การสลายตัวของสารประกอบโลหะไปสู่การรวมตัวกับผลิตภัณฑ์ในการผลิตปูนซีเมนต์และความเสถียรภาพของสารประกอบโลหะนั้น ซึ่งสองสิ่งนี้จะเป็นคำตอบสำหรับหลายๆ คำถามเกี่ยวกับการจัดการที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานที่มีการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงจากกากอุตสาหกรรมมาเผาพร้อมกับการผลิตซีเมนต์ ในอดีตมีงานวิจัยมากมายเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการรวมตัวของโลหะกับซีเมนต์ และศึกษาเรื่องเสถียรภาพของโลหะดังกล่าวในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 2.8 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Dalton และคณะ, 2004)

ชนิดของโลหะ	สมบัติและผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์
สารหนู	โดยทั่วไปจะเข้าไปอยู่ในปูนเม็ด แต่ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์
แคดเมียม	ความเข้มข้นของแคดเมียมในปูนเม็ดจะลดลงเมื่อมีปริมาณคลอไรด์ในเตาเผาเพิ่มขึ้น
โครเมียม	สามารถลดอุณหภูมิของการก่อตัว $C_3S$ ได้ถ้ามีปริมาณมากกว่าร้อยละ 3 มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในปูนเม็ด โดยจะเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณของโลหะสูงกว่า (ร้อยละ 2.5-5 โดยน้ำหนัก) ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาทั่วไป
ทองแดง	ผลกระทบมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับรูปที่ก่อตัวขึ้น (ออกไซด์ เกลือ หรือ ซัลไฟด์)
ตะกั่ว	เป็นโลหะที่ระเหยได้ และสามารถสะสมในปูนเม็ดโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบหากมีปริมาณน้อยกว่า 70 ส่วนในล้านส่วน
ปรอท	เป็นโลหะที่ระเหยได้ง่ายมากและคาดว่าจะมีการหลุดออกไปกับก๊าซทางปล่องควัน ส่วนความรู้เรื่องผลกระทบต่อการผลิตปูนเม็ดยังไม่มีการศึกษาที่เพียงพอ
สังกะสี	ความแตกต่างของรูปที่ก่อตัวขึ้น สามารถก่อให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกัน เช่น เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนของปูนเม็ด และลดความสามารถในการบดได้ มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในปูนเม็ด โดยจะเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณของโลหะสูงกว่า (ร้อยละ 2.5-5 โดยน้ำหนัก) ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาทั่วไป
เวเนเดียม	เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนของปูนเม็ด และลดความสามารถในการบดได้

### 2.4.3 สถานภาพของโลหะหนักในการผลิตซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ถึงแม้จะมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในซีเมนต์และฝุ่นปูนจากการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิง แต่จากลักษณะการทดลองเองสามารถจัดหมวดหมู่ได้เป็นสามกลุ่มหลัก กลุ่มแรกเป็นการศึกษาที่ทำในห้องปฏิบัติการเป็นหลัก กลุ่มที่สองได้มาจากการคำนวณตามแบบจำลอง และกลุ่มที่สามได้มาจากการทดลองในเตาเผาจริงของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ทั้งสามกลุ่มนี้มีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน แต่ก็สามารถช่วยเติมเต็มความเข้าใจในแต่ละส่วนที่แตกต่างกันได้

ตารางที่ 2.9 ร้อยละของการรวมตัวของโลหะบางชนิดในซีเมนต์ จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ชนิดของโลหะ	ปริมาณโลหะที่รวมตัวอยู่ในซีเมนต์ (%โดยน้ำหนัก)		อ้างอิง	หมายเหตุ
	ซีเมนต์	ฝุ่นปูน		
แคดเมียม	51	NA	Sprung, 1985	อ้างถึงใน Espinosa และ Tenorio, 2000
โครเมียม	99	NA	Sprung, 1985	อ้างถึงใน Ract และคณะ, 2003
	84	NA	Murat และ Sorrentino, 1996	อ้างถึงใน Espinosa และ Tenorio, 2000 ใช้ CrCl <sub>3</sub> ในการวิจัย
ทองแดง	99.3	NA	Ract และคณะ, 2003	
นิกเกิล	97	NA	Sprung, 1985	อ้างถึงใน Espinosa และ Tenorio, 2000
ตะกั่ว	37.1	NA	Andrade และคณะ, 2003	ใช้ Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ในการวิจัย
	25	NA	Sprung และ Rechenberg,	อ้างถึงใน Andrade และคณะ, 2003
	72-79	NA	1994	-ความขัดแย้งหลายอย่างของอัตราการรวมตัวกันของตะกั่ว ขึ้นอยู่กับการป้อนสารประกอบตะกั่วที่แตกต่างกัน
	97	NA	Locher, 1989	-เป็นที่ทราบกันว่าตะกั่วมีการสูญหายออกไปเนื่องจากการระเหยที่อุณหภูมิ 750° C โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีปริมาณของคลอไรด์อยู่ด้วย (จากการป้อน PbCl <sub>2</sub> ) ทำให้ตะกั่วยึดติดกับปูนเม็ดในปริมาณต่ำ
	100	NA	Gerger, 1994 Kirchner, 1986	
เวเนเดียม	69.6	NA	Andrade และคณะ, 2003	ใช้ NH <sub>4</sub> VO <sub>3</sub> ในการวิจัย
สังกะสี	86	NA	Andrade และคณะ, 2003	ใช้ ZnO ในการวิจัย
	75	NA	Caponero และ Tenorio, 2000	อ้างถึงใน Espinosa และ Tenorio, 2000

NA: Not Available (ไม่มีการรายงาน)

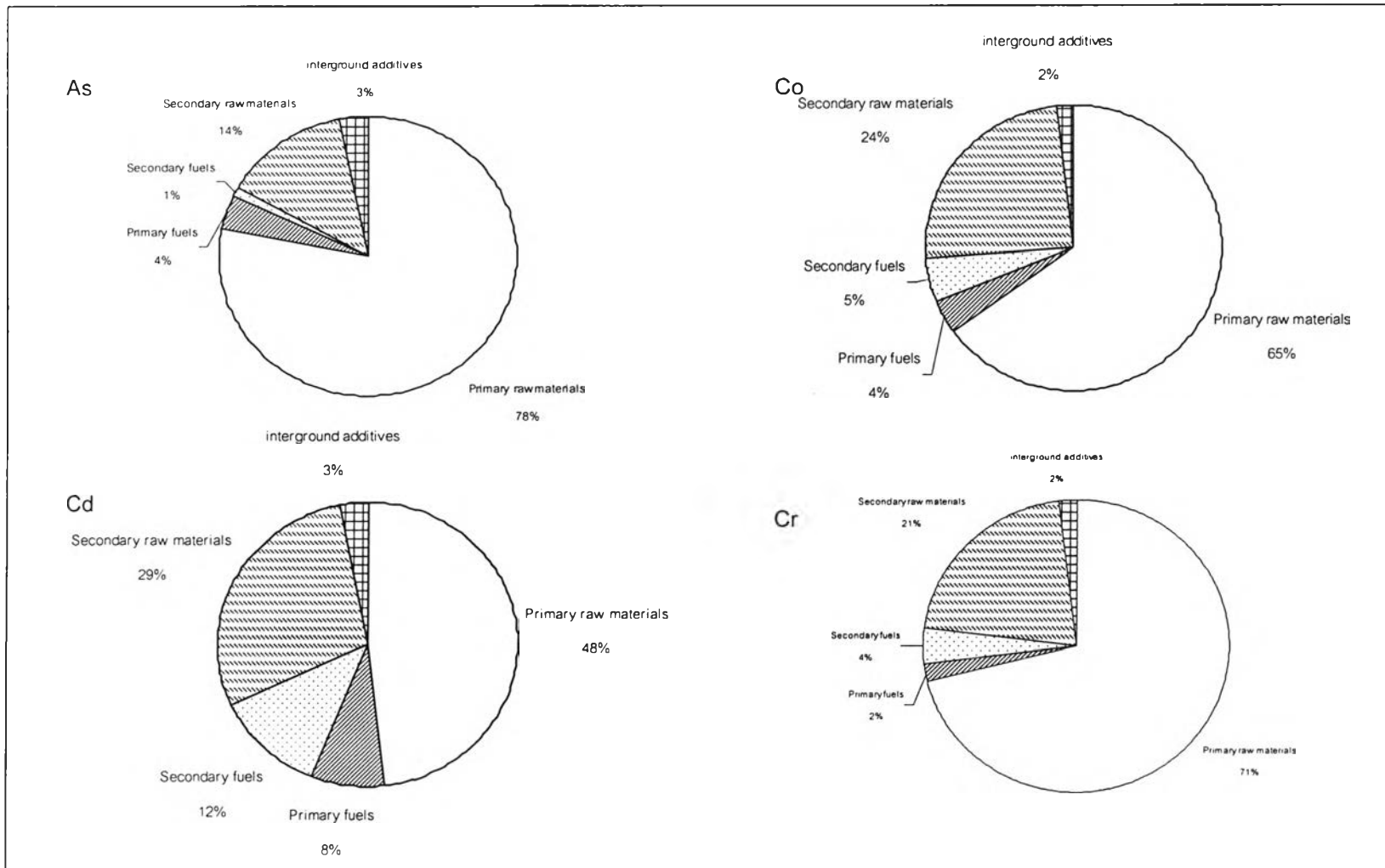
ข้อมูลจากการทดลองในกลุ่มแรกมีรายละเอียดสรุปในตารางที่ 2.9 จากการทำงานวิจัยทั้งหมดในกลุ่มนี้เป็นการทดลองด้วยเตาไฟฟ้าในห้องทดลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิในการสังเคราะห์ซีเมนต์ ทำให้คาดว่า การทดลองในกลุ่มนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าในเตาเผาจริง (Lea, 1970) นอกจากนี้ในการผลิตซีเมนต์จำลองที่ได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ มีความเป็นไปได้ที่จะได้รับตัวอย่างที่เป็นตัวแทนที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ได้จากเตาเผาจริงเช่นกัน แต่ยังมีข้อด้อยบางประการซึ่งอาจลดความน่าเชื่อถือของการทดลองกลุ่มนี้ลง อย่างแรกคือ ซีเมนต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากการจำลองการเผานั้นโดยทั่วไปจะดำเนินการเผาในบ้านหลอมที่ทำจากทองคำขาว (Platinum) ซึ่งแทบเป็นไปได้ที่จะเกิดการผสมระหว่างวัตถุดิบและของเสียที่ประกอบด้วยโลหะได้สมบูรณ์เหมือนกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงในเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) (Lea, 1970) ปรากฏการณ์ที่เกิดบนพื้นผิวนี้จะมีบทบาทสำคัญต่อสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและทางเคมีของซีเมนต์ ดังนั้นการที่ไม่สามารถจำลองการผสมอย่างสมบูรณ์ที่เกิดภายในเตาเผาซีเมนต์จริงได้นั้น จึงเป็นหนึ่งในข้อด้อยที่สำคัญของการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ อีกทั้งการทดลองส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้จะใช้เกลือของโลหะ เช่น เกลือไนเตรตของโลหะ เกลือคลอไรด์ของโลหะ และ เกลือออกไซด์ของโลหะ แทนการใช้ของเสียจริงที่อาจมีสมบัติทางกายภาพและเคมีแตกต่างไปจากเกลือโลหะในการทดลองเหล่านี้อย่างมาก ด้วยเหตุนี้การเข้าใจถึงพฤติกรรมของเกลือโลหะเมื่อมีการเผาร่วมกับการผลิตปูนซีเมนต์เพียงลำพัง อาจไม่สามารถให้คำตอบที่น่าเชื่อถือเกี่ยวกับการเผาซีเมนต์ร่วมกับของเสียจริงในเตาเผาจริงได้ นอกจากนี้ควรสังเกตว่างานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดดังสรุปในตารางที่ 2.9 นั้น ไม่สามารถอ้างได้ว่าเป็นการศึกษาสถานะภาพของโลหะหนักในซีเมนต์ที่สมบูรณ์แบบ ดังจะเห็นได้จากไม่มีงานวิจัยใดในตาราง ที่รายงานถึงการรวมตัวของโลหะหนักในฝุ่นปูน อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากข้อจำกัดของการทดลองเองที่มีการสังเคราะห์ตัวอย่างซีเมนต์จากการเผาเกลือของโลหะกับวัตถุดิบในเตาไฟฟ้า ซึ่งทำให้เป็นไปได้ยากที่จะมีการศึกษาการรวมตัวของโลหะในฝุ่นปูนในระบบนั้นได้ และร้อยละของการรวมตัวของโลหะแต่ละตัวดังตารางที่ 2.9 ก็ไม่อาจยืนยันได้ถึงร้อยละของโลหะหนักกว่ายังคงเป็นเช่นเดิมหรือมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านช่วงเวลาในวัฏจักรชีวิตของซีเมนต์

งานวิจัยในกลุ่มที่สองดำเนินการโดยการคำนวณตามแบบจำลองที่มีการคิดขึ้นโดย Achterbosch และคณะ (2003) กลุ่มผู้วิจัยได้ศึกษาถึงการถ่ายโอนของโลหะหนัก จากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและทดแทนไปสู่ซีเมนต์ โดยวิเคราะห์จากสมดุลการเข้าและออกของสารในระบบ (Material Flow) กลุ่มผู้วิจัยพยายามที่จะเน้นเรื่องอิทธิพลการส่งผ่านโลหะหนักจากวัตถุแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าไปและความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดที่พบในผลิตภัณฑ์ โดยใช้แหล่งข้อมูลประมาณ 300 แหล่งด้วยกันเพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการคำนวณตามแบบจำลองในแบบบนลงล่าง (Top Down Approach)

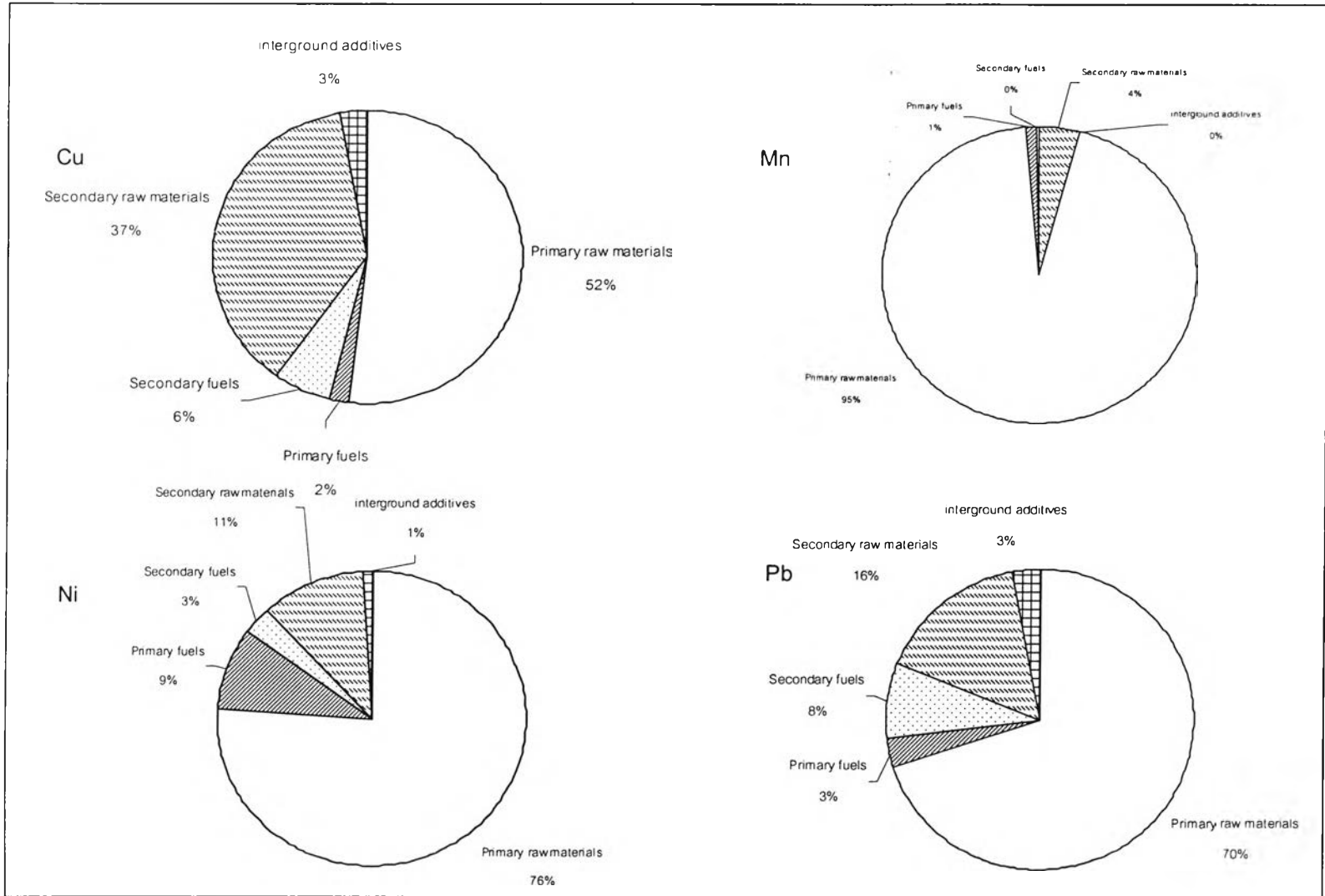
วิธีการคิดแบบบนลงล่างนี้ใช้ในการคำนวณอิทธิพลการส่งผ่านโลหะหนักจากวัสดุแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการผลิตของทุกโรงงาน โดยไม่พิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างระบบของแต่ละโรงงาน พื้นฐานของวิธีคิดนี้อยู่ที่การผลิตซีเมนต์ทั้งหมดทั้งประเทศและปริมาณที่แน่นอนของวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และของเสียในปีนั้น รวมไปถึงความเข้มข้นของโลหะหนักในแต่ละส่วนด้วย จากวิธีคิดนี้กลุ่มผู้วิจัยสรุปตามลักษณะรูปแบบการกระจายตัวของโลหะหนักจากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงเข้าสู่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้เป็น 4 หมวดดังตารางที่ 2.10 และดังรูปที่ 2.6 ถึง 2.8 ซึ่งแสดงปริมาณ (เป็นร้อยละ) ในแต่ละระดับที่ป้อนสู่ระบบ ไปจนถึงความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แม้จะเห็นได้ชัดว่าวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลักเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่เป็นที่มาของโลหะหนัก แต่วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนที่ป้อนสู่ระบบก็เป็นตัวที่ก่อให้เกิดโลหะหนักในซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญได้เช่นกัน และยังมีความแตกต่างกันของโลหะหนักที่พบอีกด้วยซึ่งสามารถสรุปได้จากการพิจารณารูปเหล่านี้ร่วมกับข้อมูลในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.10 การกระจายตัวของโลหะหนักจากหลายเส้นทางที่เข้าสู่ระบบการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Achterbosch และคณะ, 2003)

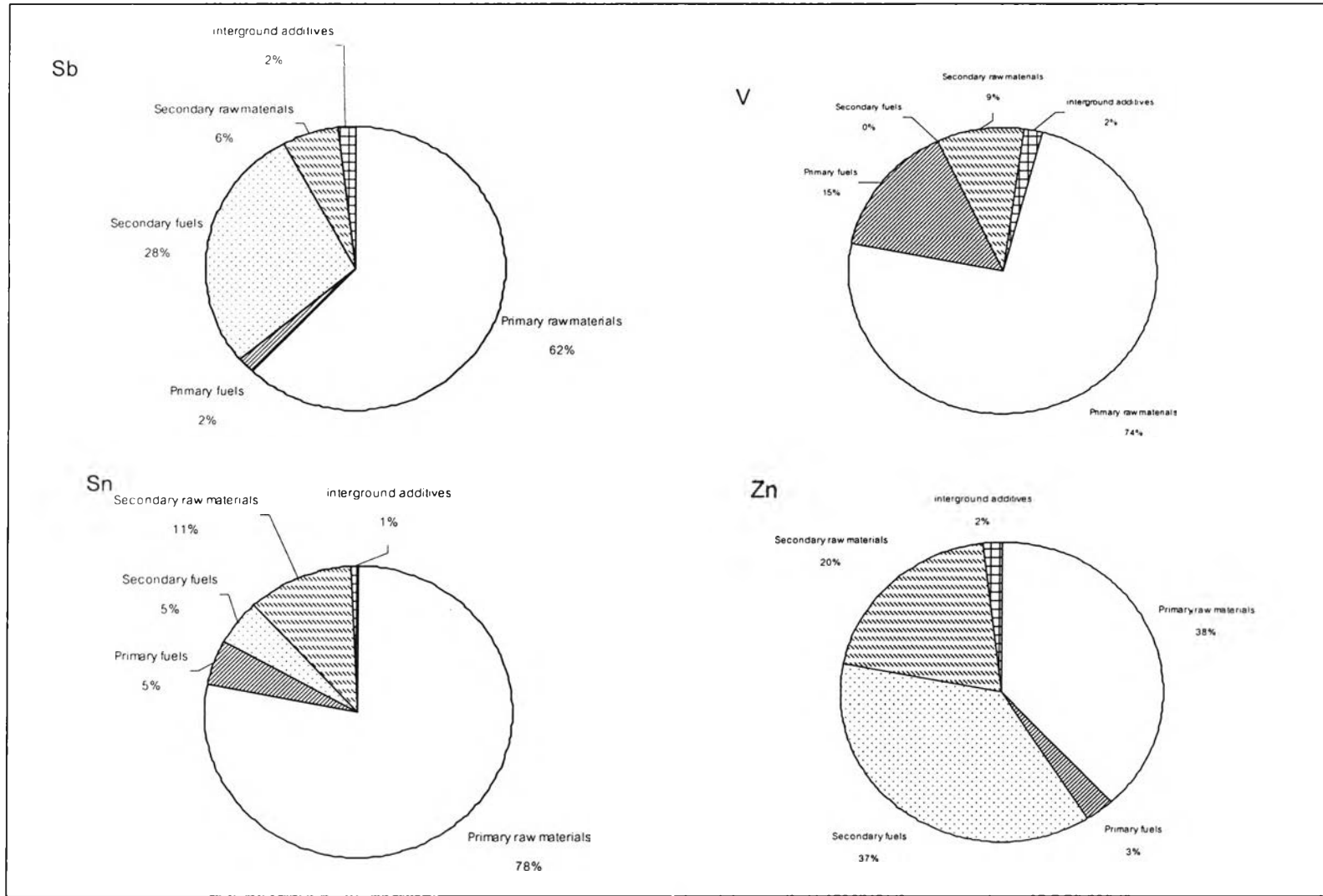
หมวด	รายละเอียด	โลหะหนัก
หมวด 1	ปริมาณของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในปูนซีเมนต์ ได้รับอิทธิพลมาจากวัตถุดิบหลักน้อยกว่าร้อยละ 55	แคดเมียม ทองแดง สังกะสี
หมวด 2a	ปริมาณของโลหะหนักได้รับอิทธิพลมาจากวัตถุดิบหลักระหว่างร้อยละ 60-80	มาจากเชื้อเพลิงหลักเป็นหลัก นิกเกิล เวเนเดียม
หมวด 2b	ส่วนปริมาณโลหะหนักที่มาจากเชื้อเพลิงจะมีอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่มาจากวัตถุ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



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ กับปริมาณ (เป็นร้อยละ) ของสารหนู แคดเมียม โคบอลต์ และโครเมียมที่พบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ กับปริมาณ (เป็นร้อยละ) ของทองแดง นิกเกิล แมงกานีส และตะกั่วที่พบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ กับปริมาณ (เป็นร้อยละ) ของพลวง ดีบุก เวนเนเดียม และสังกะสี ที่พบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ตารางที่ 2.11 ของเสียที่เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และโลหะหนักที่เกี่ยวข้อง (Achterbosch และคณะ, 2003)

โลหะ	เชื้อเพลิงทดแทน	วัตถุดิบทดแทน
สารหนู		แก้าลอยจากถ่านหิน ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก
แคดเมียม	ยางที่ใช้แล้ว สกัดส่วนจากของเสียชุมชน ของเสียทางการค้า และของเสียอุตสาหกรรม	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก
โคบอลต์	ยางที่ใช้แล้ว	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก แก้าลอย และทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ
โครเมียม	ยางที่ใช้แล้ว	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก แก้าจากกระบวนการเผา
ทองแดง	สกัดส่วนจากของเสียชุมชน ของเสียทางการค้า และของเสียอุตสาหกรรม	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก แก้าลอยจากถ่านหิน
นิกเกิล		ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก แก้าลอยจากถ่านหิน
ตะกั่ว	ยางที่ใช้แล้ว ของเสียประเภทน้ำมัน	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก แก้าลอยจากถ่านหิน
พลวง	ยางที่ใช้แล้ว สกัดส่วนจากของเสียชุมชน ของเสียทางการค้า และของเสียอุตสาหกรรม	
ดีบุก		ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก
เทลลูเรียม	ยางที่ใช้แล้ว	แก้าลอยจากถ่านหิน
เวเนเดียม		แก้าลอยจากถ่านหิน
สังกะสี	ยางที่ใช้แล้ว ของเสียประเภทน้ำมัน	ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล็ก แร่เหล็ก

จากข้อมูลในตารางที่ 2.10 สำหรับสังกะสีและแคดเมียม (หมวดที่ 1) วัตถุประสงค์หลักมีอิทธิพลในการส่งผ่านโลหะหนักนี้ในปริมาณไม่ถึงครึ่งหนึ่งของปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในซีเมนต์ โดยวัตถุประสงค์ที่สำคัญที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาคือกากจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ส่วนเชื้อเพลิงทดแทนที่สำคัญคือ ยางที่ใช้แล้ว น้ำมันที่ทิ้งแล้ว และส่วนที่เป็นขยะชุมชนและกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

สำหรับพลวง และเวเนเดียม (หมวดที่ 2) วัตถุประสงค์หลักจะส่งผ่านโลหะหนักนี้ประมาณร้อยละ 60 และ 74 ของความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดในซีเมนต์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน สำหรับพลวงนั้นมาจากเชื้อเพลิงทดแทนที่สำคัญคือ ยางที่ใช้แล้ว และส่วนที่เป็นขยะชุมชนและกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับเวเนเดียมมาจากเชื้อเพลิงที่สำคัญคือถ่านหินน้ำมัน

สำหรับโคบอลต์และโครเมียม (หมวดที่ 3) นอกจากวัตถุประสงค์หลักแล้ว วัตถุประสงค์ทดแทนก็มีอิทธิพลอย่างมากที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน จากการทบทวนเอกสารพบว่าการใช้กากอุตสาหกรรมจากอุตสาหกรรมเหล็กและถ่านลอกจากถ่านหินก่อให้เกิดการส่งผ่านโคบอลต์เข้าไปในซีเมนต์ ส่วนโครเมียมเกิดการใช้กากอุตสาหกรรมจากอุตสาหกรรมเหล็กและถ่านจากกระบวนการเผาไหม้เป็นปัจจัยหลัก

สำหรับการส่งผ่านโลหะของตะกั่วและดีบุก (หมวดที่ 4) มีที่มาจากเชื้อเพลิงและวัตถุประสงค์ทดแทนในปริมาณที่เกือบเท่ากัน วัตถุประสงค์ทดแทนที่สำคัญมาจากการใช้กากอุตสาหกรรมจากอุตสาหกรรมเหล็กและถ่านลอกจากถ่านหินเป็นหลัก

แม้ว่าการวิเคราะห์ตามวิธีของ Achternbotch และคณะ สามารถทำให้เข้าใจถึงการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากวัตถุประสงค์และเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและทดแทนไปยังซีเมนต์ แต่ไม่อาจสรุปได้ว่าเป็นการศึกษาที่ครบถ้วนสมบูรณ์ ปัญหาที่สำคัญคือประเด็นความน่าเชื่อถือของกระบวนการวิเคราะห์เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อสรุปของการศึกษาเกี่ยวกับสถานะภาพของโลหะหนักในการผลิตซีเมนต์ เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ตามวิธีของ Achternbotch นั้นมาจากการค้นคว้าข้อมูลในอินเทอร์เน็ต บทความทางวิชาการ (Zement-Kalk-Gibs, Entsorgungspraxis, Umweltpraxis, Mull และ Abfall บทความเกี่ยวกับของเสียอันตราย และอื่นๆ) วิทยานิพนธ์ทั้งระดับปริญญาเอกและ ปริญญาโท รายงานจากหน่วยงานภาครัฐและ Bundesanstalt für Geowissenschaften และ Rohstoffe การสัมภาษณ์ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านอุตสาหกรรมเหล็กและการนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นที่น่าเสียดายที่มีเพียงไม่กี่ข้อมูลเท่านั้นที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์โดยตรง ทำให้ประเด็นนี้ กระทบความน่าเชื่อถือของข้อสรุปที่ได้อย่างมาก

กลุ่มสุดท้ายของงานวิจัยคือการทดลองในเตาเผาจริงของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์  
 ลิ่งที่ได้จากกลุ่มนี้ไม่ได้ศึกษาแค่ความเข้มข้นของโลหะหนักในซีเมนต์เท่านั้น แต่ยังมีความเข้มข้น  
 ในฝุ่นปูน และก๊าซของโลหะที่ระบายออกจากกระบวนการผลิตอีกด้วย ตารางที่ 2.12 แสดง  
 งานวิจัยที่รายงานโดยสถาบันวิจัยเรื่องการเผาไหม้ (Combustion Research Institute: CRI,  
 1991) เรื่องโลหะหนักที่ปนเปื้อนในก๊าซที่ระบายออกจากกระบวนการผลิตซีเมนต์ที่มีการใช้ของ  
 เสี้ยอันตรายเป็นเชื้อเพลิง พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในก๊าซจากกระบวนการดังกล่าวมี  
 ความแตกต่างกันเล็กน้อยจากกระบวนการผลิตที่มีการใช้เชื้อเพลิงปกติ อย่างไรก็ตามการสังเกตที่  
 ได้นี้มีความตรงกันข้ามอย่างเห็นได้ชัดกับรายงานของ Bolstad เรื่องการทดลองเผาโดยใช้  
 กระบวนการเผาซีเมนต์แบบเปียกในปี 1983 ผลคือความเข้มข้นของโลหะแคดเมียม ทองแดง  
 ตะกั่ว ปรอท และเซเลเนียมในก๊าซนั้นมีค่าสูงขึ้นอย่างมากเมื่อมีการใช้ของเสี้ยอันตรายเป็น  
 เชื้อเพลิงในการเผา (Environmental Toxicology International, 1992) แต่ท่ามกลางการเพิ่มขึ้น  
 ของโลหะเหล่านี้ กลับพบความเข้มข้นของนิกเกิลลดลงอย่างมากในก๊าซที่ออกมาแม้จะเป็นการ  
 เผาที่ใช้ของเสี้ยอันตรายเป็นเชื้อเพลิงเช่นกัน จากความแตกต่างของการศึกษาทั้งสองดังกล่าวซึ่ง  
 เกิดขึ้นในสองช่วงเวลาที่แตกต่างกัน อาจสรุปได้ว่าคุณภาพของของเสี้ยอันตรายที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง  
 ในช่วงยุคต้นของปี 1980 และยุคต้นของปี 1990 นั้นมีความแตกต่างกัน (Environmental  
 Toxicology International, 1992) ข้อสมมติฐานนี้ถูกสนับสนุนโดย Benestad (1989) (อ้างถึงใน  
 Environmental Toxicology International, 1992) ซึ่งเป็นผู้ทบทวนผลของการทดลองเผาโดยใช้  
 กระบวนการผลิตซีเมนต์แบบแห้ง ในประเทศนอร์เวย์ในปี 1983 และ 1987 Benestad ตั้ง  
 ข้อสังเกตว่าความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมลดลงอย่างเห็นได้ชัดในเชื้อเพลิงที่เป็นของเสี้ย  
 ทั่วไปในระหว่างปี 1983 และ 1987 จากผลของการลดลงนี้ทำให้ไม่สามารถศึกษาความแตกต่างที่  
 ชัดเจนของโลหะตะกั่วและแคดเมียมในก๊าซที่ระบายออกจากกระบวนการผลิตในปี 1987 ได้ เมื่อมี  
 การเผาโดยใช้เชื้อเพลิงที่เป็นของเสี้ยอันตราย จากการทดลองและผลที่ถูกกล่าวอ้างนี้สามารถ  
 อนุมานได้ว่าเชื้อเพลิงที่เป็นของเสี้ยอันตรายในสหรัฐอเมริกาที่มีแนวโน้มที่เป็นไปในการทำงาน  
 เดียวกัน

ตารางที่ 2.12 เปรียบเทียบโลหะหนักต่างๆ ในก๊าซที่ระบายออกจากเตาเผาซีเมนต์ระหว่างเตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงปกติและเตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงของเสียอันตราย (CRI, 1991 อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992)

โลหะ	การเผาโดยใช้เชื้อเพลิงปกติ (มก./วินาที)				การเผาโดยใช้เชื้อเพลิงของเสียอันตราย (มก./วินาที)			
	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
พลวง	0.685	1.58	<0.010	5.76	0.808	1.78	<0.010	5.08
สารหนู	0.991	1.65	<0.007	5.70	0.592	0.89	<0.007	2.80
แบเรียม	10.70	37.70	0.035	166.00	19.90	47.30	0.0218	144.76
เบริลเลียม	0.044	0.108	<0.001	<0.369	0.045	0.11	<0.001	<0.326
แคดเมียม	0.344	0.376	<0.022	1.29	0.309	0.317	<0.022	1.34
โครเมียม	20.60	58.50	<0.010	264.00	12.50	52.40	<0.010	299.10
ตะกั่ว	1.95	2.37	0.053	12.00	5.83	10.40	0.021	50.80
ปรอท	0.984	2.39	0.054	10.70	2.14	2.96	0.132	9.84
นิกเกิล	17.30	40.10	<0.066	138.00	11.00	34.50	0.07	171.40
เซเลเนียม	0.072	0.068	<0.007	0.26	0.045	0.068	0.0003	<0.195
เงิน	0.555	1.04	<0.022	3.96	0.886	2.26	<0.022	7.94
เทลลูเรียม	1.40	1.95	<0.007	5.77	0.806	1.78	<0.007	5.08
เวเนเดียม	0.338	0.221	<0.089	<0.62	0.359	0.245	<0.087	0.62
สังกะสี	2.97	2.51	0.334	7.80	1.53	1.58	0.147	6.48

นอกจากนี้ Portland Cement Association (1991) (อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ตัวอย่างซีเมนต์จากเตาเผา 97 แห่งในอเมริกาเหนือ ที่มีการใช้เชื้อเพลิงทั้งที่เป็นของเสียอันตรายและไม่เป็นของเสียอันตราย มีผลสรุปแสดงในตารางที่ 2.13 อาจสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการรวมตัวและความเข้มข้นของโลหะในซีเมนต์นั้นประกอบด้วย ประเภทของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผา การออกแบบระบบ และการดำเนินการศึกษา ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ตัวอย่างของฝุ่นปูนจากเตาเผาในอเมริกาเหนือทั้ง 97 แห่งเช่นกันที่มีการใช้เชื้อเพลิงทั้งที่เป็นของเสียอันตรายและไม่เป็นของเสียอันตราย โดยมีการรายงานความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูนแสดงดังตารางที่ 2.14 จากการตรวจสอบค่าสูงสุดของความเข้มข้นของโลหะในฝุ่นปูน

Portland Cement Association ได้สรุปว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อความเข้มข้นสูงๆ นี้คือกรณีที่มีการหมุนเวียนปริมาณของฝุ่นปูนกลับมาใช้ซ้ำในเตาเผาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตซีเมนต์ที่มีการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของโลหะที่สามารถระเหยได้สูงอยู่ด้วย เช่น แคลเซียม ตะกั่ว เซเลเนียม และเทลลูเรียม และมีการหมุนเวียนเฉพาะในส่วนที่เป็นฝุ่นปูนเท่านั้น เช่นเดียวกับในปี 1982 หน่วยงานที่ศึกษาเรื่องเหมืองแร่ของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Bureau of Mines) มีการวิเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นปูนจำนวน 113 ตัวอย่าง ที่มีการเก็บรวบรวมมาจากแหล่งที่มีการผลิตซีเมนต์ 102 แห่งด้วยกัน โดยผลจากการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2.15 ซึ่งมีข้อสังเกตว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะโดยเฉลี่ยระหว่างค่าจากตารางนี้กับค่าที่มีการศึกษาโดย Portland Cement Association ดังตารางที่ 2.14 จะสังเกตได้ว่าข้อมูลทั้งสองไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าแม้กระบวนการผลิต เชื้อเพลิง และวัตถุดิบของแต่ละโรงงานจะมีความแตกต่างกันก็ตาม แต่ค่าความเข้มข้นของโลหะที่พบในฝุ่นปูนค่อนข้างจะคงที่ (Environmental Toxicology International, 1992)

ตารางที่ 2.13 ความเข้มข้นของโลหะหนักในซีเมนต์ (PCA, 1991 อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992)

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้นของโลหะหนักในซีเมนต์ (ppm)		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
พลวง	2.40	0.70	4.00
สารหนู	19.00	5.00	71.00
แบเรียม	280.00	91.00	1420.00
เบริลเลียม	1.10	0.30	3.10
แคลเซียม	0.34	0.03	1.12
โครเมียม	76.00	25.00	422.00
ตะกั่ว	11.00	1.00	75.00
ปรอท	0.014	0.00005	0.039
นิกเกิล	31.00	10.00	129.00
เซเลเนียม	1.42	0.62	2.23
เงิน	9.20	6.75	19.90
เทลลูเรียม	1.08	0.01	2.68

ตารางที่ 2.14 ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูน (ppm) สํารวจเมื่อปี 1991 (PCA, 1991 อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992)

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูน (ppm)		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
พลวง	2.00	0.30	3.40
สารหนู	18.00	2.00	159.00
แบเรียม	172.00	35.00	767.00
เบริลเลียม	0.65	0.13	3.54
แคดเมียม	10.30	0.10	59.60
โครเมียม	41.00	8.00	293.00
ตะกั่ว	360.00	34.00	7390.00
ปรอท	0.66	0.004	25.50
นิกเกิล	22.00	1.00	60.00
เซเลเนียม	28.14	2.68	307.00
เงิน	10.53	4.80	40.70
แทลเลียม	43.24	1.40	776.00

ตารางที่ 2.15 ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูน (ppm) สํารวจเมื่อปี 1982 (U.S. Bureau of Mines, 1982 อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992)

ชนิดของโลหะ	ความเข้มข้นของโลหะหนักในฝุ่นปูน (ppm)		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
พลวง	7.50	<1.60	70.00
สารหนู	24.00	1.30	518.00
แบเรียม	-	<55	<55.00
เบริลเลียม	-	<2.00	<2.00
แคดเมียม	23.00	<1.50	352.00
โครเมียม	42.00	11.00	172.00
ตะกั่ว	264.00	<26.00	1750.00
ปรอท	0.52	<0.13	1.00
นิกเกิล	30.00	<12.00	91.00
เซเลเนียม	-	-	-
เงิน	8.30	<3.00	17.00
แทลเลียม	-	<60.00	185.00

นอกเหนือจากความเข้มข้นของโลหะหนักที่แสดงในตารางที่ 2.13-2.15 แล้วนั้น งานวิจัยในกลุ่มสุดท้ายยังช่วยให้เข้าใจและสรุปได้ถึงพฤติกรรมทั่วไปของโลหะในเตาเผาซีเมนต์ได้ Sprung (1985) (อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992) ซึ่งว่าการกระจายตัวของโลหะระหว่างในปูนเม็ด และฝุ่นปูนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะที่ป้อนเข้าสู่เตาเผา ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ และกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามแต่ละปัจจัยที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อสถานภาพของโลหะ จะแปรเปลี่ยนไปตามแต่ละธาตุ ตัวอย่างคือ การกระจายตัวของตะกั่วในซีเมนต์ขึ้นอยู่กับทั้งกระบวนการผลิตและปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ Branscome และ Mournighan (1987) (อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของฮาโลเจนมีบทบาทที่สำคัญต่อสถานภาพของตะกั่วในการผลิตซีเมนต์ โดยมีข้อพิสูจน์ความจริงที่ว่า เมื่อนำน้ำมันที่ทิ้งแล้วที่มีปริมาณของตะกั่วสูง แต่มีปริมาณฮาโลเจนต่ำ นำมาเผาในเตาเผาซีเมนต์โดยใช้กระบวนการแบบแห้ง พบว่าไม่มีการเพิ่มของไอตะกั่วที่ออกจากระบบและตะกั่วส่วนใหญ่คงอยู่ในปูนเม็ด ในทางกลับกันเมื่อนำของเสียพวกคลอไรด์ที่มีปริมาณตะกั่วต่ำมาเผาโดยใช้กระบวนการแบบเปียก พบว่าการออกมาของไอตะกั่วจะเพิ่มขึ้นและตะกั่วส่วนใหญ่คงอยู่ในฝุ่นปูนอีกด้วย ข้อสรุปที่เป็นไปได้จากการสังเกตในครั้งนี้คือเมื่อเกิดคลอไรด์ของตะกั่วเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถระเหยได้ทำให้ไอของตะกั่วที่ออกมาจะมีการเปลี่ยนการกระจายตัวจากปูนเม็ดไปยังฝุ่นปูนได้ Sprung (1985) (อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992) ได้สรุปว่าแคดเมียมมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับตะกั่ว

ในทางตรงกันข้าม Sprung (1985) ได้แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของสังกะสีนั้นไม่ค่อยมีความสัมพันธ์ต่อทั้งกระบวนการผลิตและปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ และจะมีการยึดติดอยู่กับปูนเม็ดในปริมาณสูง Sprung ยังค้นพบว่าสารหนู โครเมียม และนิกเกิลมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายกับสังกะสีอีกด้วย สำหรับโลหะที่สามารถระเหยได้เช่น แทลเลียมและตะกั่ว Sprung ค้นพบว่าการยึดติดอยู่กับปูนเม็ดในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 ในทำนองเดียวกัน Von Seebach และ Tompkins (1991) (อ้างถึงใน Environmental Toxicology International, 1992) ค้นพบว่าการยึดติดของแทลเลียมอยู่กับปูนเม็ดประมาณร้อยละ 10 และมีการยึดติดของปรอทอยู่กับปูนเม็ดประมาณร้อยละ 39 อันเนื่องมาจากความสามารถในการระเหยได้สูงของโลหะกลุ่มนี้นั่นเอง ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยคือให้มีการตรวจวัดวัตถุที่เข้าระบบอย่างเข้มงวดก่อนจะมีการเติมโลหะเหล่านี้เข้าสู่เตาเผา และให้มีการศึกษาเรื่องพฤติกรรมของโลหะเหล่านี้เพิ่มเติมต่อไป

เป็นที่น่าสังเกตว่า ถึงแม้ผลการศึกษาจากงานวิจัยกลุ่มสุดท้ายจะมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากทดลองในเตาเผาจริง แต่เงื่อนไขของการเผาจริงแฝงปัญหาสำคัญซึ่งทำให้ไม่สามารถช่วยให้ความกระจ่างของอิทธิพลของของเสียแต่ละตัวต่อความเข้มข้นของโลหะในซีเมนต์ได้ สรุป

ได้ว่างานวิจัยทั้งสามกลุ่มนี้ไม่สามารถที่จะตรวจสอบผลของสถานะภาพของโลหะหนักในการผลิตซีเมนต์ที่ใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงได้อย่างครอบคลุมครบถ้วน แต่ก็เป็งานวิจัยที่ช่วยให้เกิดการพัฒนาในการศึกษาในด้านนี้ต่อไป ตารางที่ 2.16 สรุปข้อดีและข้อเสียของแต่ละกลุ่มของงานวิจัย

ตารางที่ 2.16 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของงานวิจัยทั้งสามกลุ่มที่ต่างกัน

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

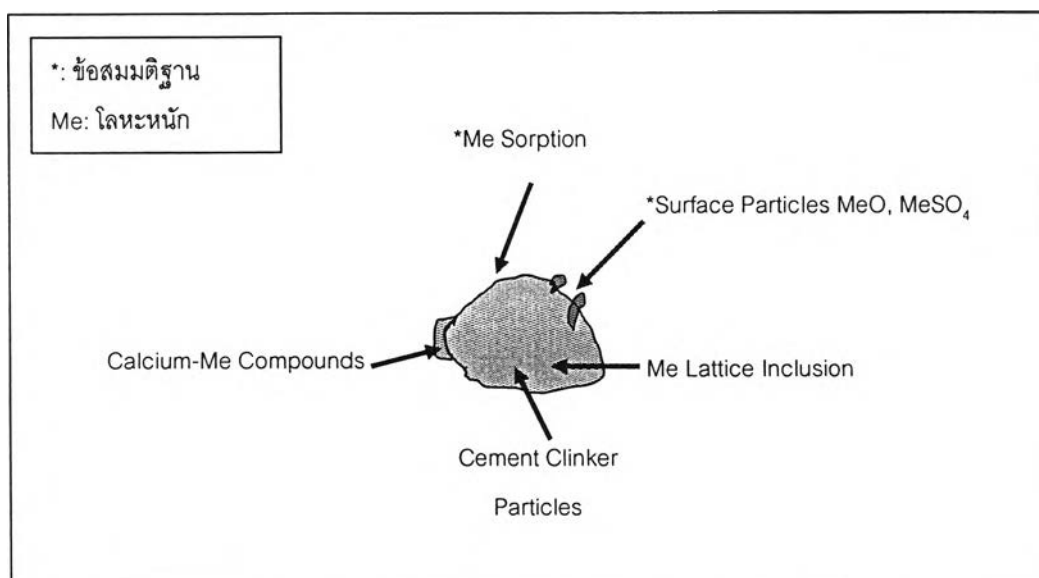
จากงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงไปทั้งหมดนั้น ส่วนใหญ่เน้นในเรื่องของการวัดปริมาณการส่งผ่านและยึดติดของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ ดังสรุปในตารางที่ 2.9 2.10 และ 2.13 ถึง 2.15 ซึ่งการที่จะสรุปว่าเรื่องการส่งผ่านโลหะนี้สามารถตอบคำถามในเรื่องสถานะภาพของโลหะในซีเมนต์ได้อย่างครบถ้วนนั้น เป็นข้อสรุปในแนวทางที่ผิดและยังไกลเกินความจริงอย่างมาก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะหนักกับซีเมนต์ หรือแม้แต่สถานะภาพของโลหะก่อนและหลังการไฮเดรชันย่อมมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นและมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ซึ่งนำมาสู่ความ



ซับซ้อนและยากต่อการทำนายสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ได้ ตัวอย่างเช่น ปูนซีเมนต์ทั่วไปที่ใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง มีวงจรถือ ซีเมนต์มีการทำปฏิกิริยากับน้ำภายใต้ปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นตัวควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างช่วงอายุการใช้งานและหลังจากการรื้อถอนทำลายของตึกหรืออาคาร ซึ่งความสัมพันธ์ของระยะเวลาต่อการส่งผ่านหรือเคลื่อนที่ของโลหะยังไม่เป็นที่ทราบอย่างแน่ชัดอาจใช้เวลาถึงกว่าหนึ่งร้อยปี จากตัวอย่างนี้ทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าร้อยละของการส่งผ่านและยึดติดของโลหะในซีเมนต์นั้นไม่สามารถบอกได้ว่าเสถียรภาพของโลหะในปูนซีเมนต์ตลอดวงจรชีวิตเป็นอย่างไร ดังนั้นความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมและเสถียรภาพของโลหะหนักในระบบซีเมนต์จึงยังเป็นปัญหาและต้องมีการศึกษากันต่อไป เพื่อช่วยให้สามารถหลีกเลี่ยงผลเสียที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างคาดไม่ถึงเมื่อมีการใช้กากอุตสาหกรรมร่วมในการเผาซีเมนต์ซึ่งไม่เพียงมีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่ออกมาเท่านั้น แต่ยังมีผลต่อสิ่งแวดล้อมและด้านสุขภาพของประชาชนอีกด้วย

เพื่อให้เข้าใจภาพรวมของสถานภาพของโลหะหนักในระบบซีเมนต์ จึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างซีเมนต์และโลหะหนัก ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ การดูดติด (Sorption) การตกผลึก (Precipitation) การรวมตัวเข้ากับโครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ (Lattice Inclusion) และการเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบในซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ (Compounds) ที่ละลายน้ำได้จำกัด (Li และคณะ, 2001) ปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ขณะยังไม่ผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชัน แสดงดังรูปที่ 2.9

พฤติกรรมของแต่ละโลหะในระบบซีเมนต์ทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความแตกต่างกันทำให้ปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับซีเมนต์มีความแตกต่างกันด้วย และมีอิทธิพลอย่างมากไม่ใช่เพียงแคในเรื่องคุณภาพและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังมีผลต่อเนื่องไปยังอีกหลายประเด็นที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น โลหะหนักที่เสถียรเมื่อมีการรวมเข้ากับเม็ดปูนซีเมนต์ ผลในด้านคุณภาพและคุณสมบัติจะไม่หยุดแค่นั้นก่อนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีผลต่อไปถึงหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์อีกด้วย ในทำนองเดียวกันโลหะหนักที่เสถียรเมื่อมีการรวมตัวเข้ากับซีเมนต์หลังปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ผลในด้านคุณภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการชะละลายของซีเมนต์ จะไม่เกิดขึ้นแค่ช่วงช่วงอายุการใช้งานเท่านั้นแต่ยังสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการรื้อถอนทำลายอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการศึกษาสถานภาพที่สมบูรณ์ของโลหะหนักเป็นหัวข้อที่น่าสนใจที่นำไปสู่แง่มุมสำคัญอื่นๆ ที่กระทบต่อคุณภาพชีวิตของมนุษย์เองอย่างมากและในขณะเดียวกันยังต้องการความพยายามและข้อมูลอีกเป็นจำนวนมากเพื่อให้บรรลุถึงความเข้าใจในองค์รวม



รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างซีเมนต์และโลหะหนัก คือการดูดติด (Sorption) การรวมตัวเข้ากับโครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ (Lattice Inclusion) และการเกิดปฏิกริยากับองค์ประกอบในซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ (Compounds)

เป็นที่น่าเสียดายสำหรับงานวิจัยที่สามารถไขข้อสงสัยเกี่ยวกับกลไกการรวมตัวของโลหะในเม็ดปูนซีเมนต์อันเนื่องมาจากการแผ่ร่วมนั้นยังมีความจำกัดอย่างมาก มีเพียงความเข้าใจในบางแง่มุมเกี่ยวกับพฤติกรรมของธาตุเวเนเดียม สังกะสี และตะกั่วที่มาจากงานของ Andrade, Maringoro และ Kihara (2003) ซึ่งแสดงแนวโน้มความชื่นชอบในการรวมตัวของโลหะเหล่านี้ในสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นผลึกรูปแบบต่างๆ ในซีเมนต์ โดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนไมโครโพรบ (EPMA) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการศึกษาซีเมนต์ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยให้มีโลหะปนเปื้อนอยู่คือ  $V_2O_5$  ร้อยละ 0.78  $ZnO$  ร้อยละ 1 และ  $PbO$  ร้อยละ 0.67 เพื่อเลียนแบบกระบวนการแผ่ร่วมนั้นที่มีเวเนเดียมในระบบโดยมีที่มาจากถ่านหินและ สังกะสีจากของเสียที่ไม่มีสารอันตราย และตะกั่วจากเชื้อเพลิงและกากอุตสาหกรรมตามลำดับ มีการตรวจสอบองค์ประกอบของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  ในซีเมนต์ที่สังเคราะห์ขึ้นกับโลหะหนักที่เติมเข้าไปโดยเครื่องอิเล็กตรอนไมโครโพรบ และมีการเปรียบเทียบกับส่วนที่มีการควบคุมที่มีการใช้วัตถุดิบชนิดเดียวกันด้วย ผลการวิจัยพบว่า การส่งผ่านของเวเนเดียมมีลักษณะชอบที่จะอยู่กับ  $C_2S$  มากกว่าที่จะอยู่กับ  $C_3S$  ส่วนทั้งสังกะสีและตะกั่วแสดงแนวโน้มการส่งผ่านที่ตรงกันข้ามโดยมีลักษณะชอบที่จะอยู่กับ  $C_3S$  มากกว่าที่จะอยู่กับ  $C_2S$

### สรุปการพัฒนาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. จากงานวิจัยที่ผ่านมาเคยมีการศึกษาผลกระทบรวมตัวในเชิงคุณภาพของโลหะสามชนิด คือ เวเนเดียม ตะกั่ว และสังกะสี แต่ยังไม่เคยมีการศึกษาในโลหะอีกหลายชนิดในปูนซีเมนต์ที่มีการเผาพร้อมกับของเสียอันตรายซึ่งที่มีความสำคัญเช่นกัน เช่น แคดเมียม โครเมียม สารหนู ปรอท นิกเกิล แทลเลียม สตรอนเชียม และเซลีนียม
2. ทางบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงยังไม่มีข้อมูลเชิงคุณภาพของโลหะ และข้อมูลอิทธิพลการแยกตัวจับกับซีเมนต์ของของเสียแต่ละชนิด ซึ่งจะมีการศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้
3. งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาผลกระทบรวมตัวในเชิงปริมาณเป็นส่วนใหญ่ แต่ในเชิงคุณภาพนั้นมีการศึกษากันน้อย และมักเป็นการศึกษาที่แยกส่วนกัน ซึ่งจะมีการศึกษาควบคู่กันไปในงานวิจัยนี้
4. งานวิจัยนี้ยังมีความต้องการที่สามารถเปรียบเทียบ ระบุที่มาโลหะ และทราบการเปลี่ยนแปลงของสถานะภาพโลหะระหว่างก่อนและหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน