สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปนในปริมาณสูง

นายพัตรยศ สมวงษ์
นายโภคิน พันธ์นิยม

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....37630
วัน, เดือน, ปี.....19 ก.ย. 2543

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDIES ON COMPRESSIVE PROPERTIES OF HEIGH HEAVY METALS CONTENT USING CEMENT

MISTER PUTTYOT SOMWONG

MISTER PHOKIN PHANNIYOM

A special Project Submitted in Partial Fulfillment of

the Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Major of Environmental Resource Chemistry

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปนในปริมาณสูง
โดย	นายพัตรยศ สมวงษ์
	นายโภคิน พันธ์นิยม
อาจารย์ที่ปรึกษา	นางยุพา ตันทวี
	นางคณิตา ตังคณานุรักษ์

ภาควิชาเคมี สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับโครงงานพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรคณะวิทยาศาสตรบัณฑิต

(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย) หัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี) ประธานกรรมการ

(อาจารย์สุจินต์ ตันติพิสิฐกุล) กรรมการ

(อาจารย์ยุพา ตันทวี) กรรมการ

(อาจารย์คณิตา ตังคณานุรักษ์) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปนในปริมาณสูง
นักศึกษา	นายพัตรยศ สมวงษ์
	นายโภคิน พันธ์นิยม
อาจารย์ที่ปรึกษา	นางยุพา ตันทวี
	นางคณิตา ดังคณานุรักษ์
ภาควิชา	เคมี
สาขา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2542

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก 4 ชนิด ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ โลหะหนักนิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในการศึกษาใช้โลหะหนักไนเตรท และโลหะหนักไนเตรทผสมทั้ง 4 ชนิด ต่อวัสดุประสานที่สัดส่วน 0.00, 0.25 และ 0.50 ทำการบ่มก้อนซีเมนต์เป็นระยะเวลา 7 วัน ทดสอบสมบัติกำลังรับแรงอัดของโลหะหนักในซีเมนต์ก้อน พบว่า ที่สัดส่วนโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.00 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ 215.34 กก./ตร.ซม. ที่สัดส่วนโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25 ซีเมนต์แท่งที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ นิกเกิล มีค่า 157.63 กก./ตร.ซม. รองลงมาเป็นตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี โดยมีค่า 143.13, 123.42 และ 40.00 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ สำหรับโลหะหนักไนเตรทผสมให้ค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 59.00 กก./ตร.ซม. ที่สัดส่วนผสมโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.50ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งที่มีนิกเกิล รองมาเป็นตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี โดยมีค่า 87.43, 68.24, 32.51 และ 17.22 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานซึ่งกำหนดค่าสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนไว้สูงกว่า 14 กก./ตร.ซม. พบว่าทั้งสองสัดส่วนผสมมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาก ยกเว้นสังกะสีที่สัดส่วน 0.5 ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย จึงพิจารณาเลือกสัดส่วนผสมโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25

ทำการทดลองศึกษาผลของระยะเวลาบ่มตัวต่อค่ากำลังรับแรงอัด โดยใช้สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25 เมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มตัวเป็น 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มตัว โดยก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วงดังต่อไปนี้ นิกเกิล 103.08-446.74 กก./ตร.ซม. สังกะสี 28.62-46.14 กก./ตร.ซม. ตะกั่ว 52.10-252.63 กก./ตร.ซม. แคดเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

85.30-199.77 กก./ตร.ซม. ส่วนโลหะหนักผสมให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์อยู่ในช่วง 39.22-316.41 กก./ตร.ซม. เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน พบว่า ทุกค่าระยะเวลาบ่มตัวให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

ดังนั้นถ้าใช้สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรท และโลหะหนักไนเตรทผสมต่อวัสดุประสาน 0.25 จะได้ก้อนซีเมนต์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดของโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิด และโลหะหนักไนเตรทผสม สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ถ้าระยะเวลาบ่มตัวของก้อนซีเมนต์เพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักมีแนวโน้มสูงขึ้น

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Studies on Compressive Properties of Heigh Heavy Metals Content Using Cement
Name	Mr. Puttyot Somwong
	Mr. Phokin Phanniyom
Special Project Advisor	Mrs. Yupa Tantawee
	Mrs. Kanita Tungkananuruk
Department	Chemistry
Major	Environmental Resource Chemistry
Academic Year	1999

Abstract

This project investigated the stabilization of heavy metal by using portland cement solidification process. Heavy metals are nickel, zinc lead and cadmium. The study use the ratio of nitrate heavy metal and mixing nitrate heavy metal to portland cement at the ratio of 0.25 and 0.50 by 7 days of curing times. The result of compressive property test of heavy metal in cement show the ratio of nitrate heavy metal 0.00. The ratio of nitrate heavy metal 0.25, the maximum compressive in cement was nickel 157.63 kg/cm^3. Lead, cadmium and zinc compressive strength were 143.13, 123.42 and 40.00 kg/cm^3, respectively. For mixing nitrate heavy metal, compressive strength was 59.00 kg/cm^3. The ratio of nitrate heavy metal 0.50, the maximum compressive strength in cement was nickel, lead, cadmium and zinc were 87.43, 68.24, 32.51 and 17.22 kg/cm^3, respectively; while compressive strength of heavy metal in standard more than 14 kg/cm^3 compare with the ratio of nitrate heavy metal at 0.25 and 0.50. Choose the ratio of nitrate heavy metal at 0.25 because of maximum compressive strength in cement and standard condition.

The study curing times to the compressive strength by using ratio of nitrate heavy metal at 0.25. While curing times increase 1, 3, 7, 14 and 28 days, respectively. The compressive strength in cement of each heavy metal increase too. Compressive strength of nickel, zinc, lead and cadmium cement ranged respectively from 103.08-446.47 kg/cm^3 ,28.62-46.14 kg/cm^3 ,52.10-252.63 kg/cm^3 , 85.30-199.77 kg/cm^3 to. While compressive strength of heavy metal mixture ranged from 39.22-316.41 kg/cm^3. Compare with standard condition, compressive strength more than standard every curing time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Therefor using the ratio of nitrate heavy metal and mixing nitrate heavy metal at 0.25. The compressive strength of each nitrate heavy metal and mixing nitrate heavy metal in cement upper standard condition and more than increase curing times of cement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ทางผู้วิจัยโครงงานพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ยุพา ตันทวี และ อาจารย์คณิตา ตังคณานุรักษ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงงานพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำโครงงานพิเศษ

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และเงินทุนในการทำโครงงานพิเศษ

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน อีกทั้งบิดามารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อน ๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วารสารปริทัศน์	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของโครงงานวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงานวิจัย	5
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎี	6
2.1 โลหะหนัก	6
2.2 ปูนซีเมนต์	12
2.2.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	12
2.2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13
2.2.3 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา	15
2.2.4 ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ	17
2.2.5 ช่องว่างของซีเมนต์ Paste	19
2.3 การบำบัดและการกำจัดของเสียอันตราย	20
2.4 การกำจัดของเสียอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน	21
2.4.1 นิยามของ Solidification	21
2.4.2 กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์	23
2.4.3 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	29
2.5.1 กำลังอัดของคอนกรีต	29
2.5.2 การบ่มคอนกรีต	32
2.5.3 การผันแปรของกำลังอัดคอนกรีต	32
2.5.4 ความเสียหายของคอนกรีต	33
2.5.5 การลดความเสียหาย	33
2.6 เกณฑ์มาตราฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน	34
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน	37
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	37
3.2 วัสดุ	38
3.3 สารเคมี	39
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์	39
3.5 วิธีทดลอง	46
3.5.1 การเตรียมก้อนซีเมนต์	46
3.5.2 ทดสอบกำลังรับแรงอัด	51
3.5.3 ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มตัวต่อกำลังรับแรงอัด	51
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	52
4.1 การศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์โลหะหนักโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อน	52
4.1.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน	52
4.1.2 การพิจารณาเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมในขั้นต้น	56
4.2 การศึกษาสัดส่วนของโลหะหนัก และโลหะหนักผสมในซีเมนต์ที่มีผลต่อสมบัติการรับแรงอัด	57
4.3 การศึกษาระยะเวลาบ่มตัวของโลหะหนัก และโลหะหนักผสมซีเมนต์ต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุปผลการวิจัย	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
ภาคผนวก	ฎ
เอกสารอ้างอิง	ฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของนิกเกิล และสารประกอบนิกเกิล	7
2.2 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสังกะสีและสารประกอบสังกะสี	8
2.3 สมบัติทางกายภาพของโลหะตะกั่ว และสารประกอบตะกั่ว	9
2.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม	11
2.5สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13
2.6 ลักษณะของสารประกอบที่เกิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13
2.7 จำนวนสารประกอบพื้นฐานที่รวมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละชนิด	14
2.8 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา	16
2.9 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา	16
2.10 กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน	24
2.11 เปรียบเทียบกระบวนการและข้อดี ข้อเสียของการกำจัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน	25
2.12 สมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธี Sealosafe	34
2.13 วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิกูลประเภทต่าง ๆ	35
4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปน	53
4.2 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปน	55
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโลหะหนักที่ทำให้เป็นก้อน	57
4.4 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของโลหะหนักที่ทำให้เป็นก้อน	59
4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มตัวต่าง ๆ	61
4.6 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มตัวต่าง ๆ	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียด้วยการทำให้เป็นก้อน	3
2.1 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา	15
2.2 ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในซีเมนต์ Paste	18
2.3 โครงสร้างของซีเมนต์ Paste	20
2.4 กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตราย	21
2.5 สรุปปัจจัยที่มีอิทิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีต	31
3.1 ตัวแปรที่ศึกษา และขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	37
3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเพชร	38
3.3 ทรายร่อนผ่านตระแกรงขนาด 20 เมช	39
3.4 เครื่องชั่ง	40
3.5 แบบหล่อขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม.	41
3.6 เครื่องผสมปูนซีเมนต์	42
3.7 เหล็กกระทุ้ง	43
3.8 เกรียง	44
3.9 เครื่องทดสอบกำลังอัด	45
3.10 ตะแกรงร่อน	45
3.11 ตัวอย่างที่หล่อเรียบร้อย	47
3.12 ลูกปูนที่ถอดจากแบบ	48
3.13 การบ่มตัวอย่าง	49
3.14 สัดส่วนของวัสดุซีเมนต์ และขั้นตอนการหล่อซีเมนต์	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

กก./ตร.ซม.	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ซม.	เซนติเมตร
ซม./วินาที	เซนติเมตรต่อวินาที
(°ซ.)	องศาเซลเซียส
%	เปอร์เซนต์
>	มากกว่า
มก./ล.	มิลลิกรัมต่อลิตร
AAS	Atomic Absorption Spectroscopy
ASTM	American Society for Testing and Material
A/V ratio	อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร
Cd	โลหะแคดเมียม
Cr	โลหะโครเมียม
Hg	โลหะปรอท
meq/g	มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม
ND	ไม่สามารถตรวจวัดได้
Ni	โลหะนิกเกิล
pH	ค่าความเป็นกรดด่าง
ppm	ส่วนในล้านส่วน
U.S.EPA	United State Environmental Protection Agency
W/C	อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหาการใช้สารเคมีประเภทโลหะหนักในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการการเรียนวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ เช่น เคมีทั่วไป เคมีเชิงฟิสิกส์ เคมีอุตสาหกรรม การประยุกต์ใช้เครื่องมือเคมีวิเคราะห์ ในแต่ละปีเป็นปริมาณไม่น้อย หากปล่อยทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำและสิ่งมีชีวิตได้ ภาควิชาได้รวบรวมของเสียที่เกิดจากการทดลองโดยแยกประเภทต่าง ๆ เช่น โลหะหนักปรอท ตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น เก็บไว้ในแกลลอนขนาด 20 ลิตร ซึ่งนับวันจะเพิ่มมากขึ้นทุกทีจนในที่สุดอาจไม่มีที่จัดเก็บได้

โลหะหนักจัดเป็นสารมลพิษที่สำคัญ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำอาจไปปนเปื้อนในน้ำ ในดิน ตะกอน และในสิ่งมีชีวิตได้ วิธีบำบัดของเสียประเภทโลหะหนักทั่วไปใช้วิธีปรับค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ตามแต่ละชนิดของโลหะหนักเพื่อตกตะกอนโลหะหนักให้อยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งวิธีนี้จะมีปริมาณโลหะหนักเหลืออยู่ในสารละลายเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้ และถ้าไม่มีการนำตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ไปบำบัดต่อก็อาจทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

วิธีการทำให้เป็นก้อน (Solidification) ด้วยซีเมนต์สามารถยับยั้งการเคลื่อนย้าย (Immobilize) โลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีปัญหาเรื่องตะกอนของเสียอันตรายที่เกิดจากการบำบัดทางเคมี และยังได้ซีเมนต์แท่งใช้ประโยชน์ในงานที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมากอีกด้วย

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน และเป็นแนวทางในการบำบัดของเสียประเภทโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งได้ทำการทดลองศึกษาความเหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการทำให้โลหะหนักแข็งตัว คือ ปริมาณโลหะหนัก และระยะเวลาบ่มตัว (Curing Time) โดยทำการทดสอบค่าความสามารถในการรับแรงอัด (Compressive Strenght) ของโลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

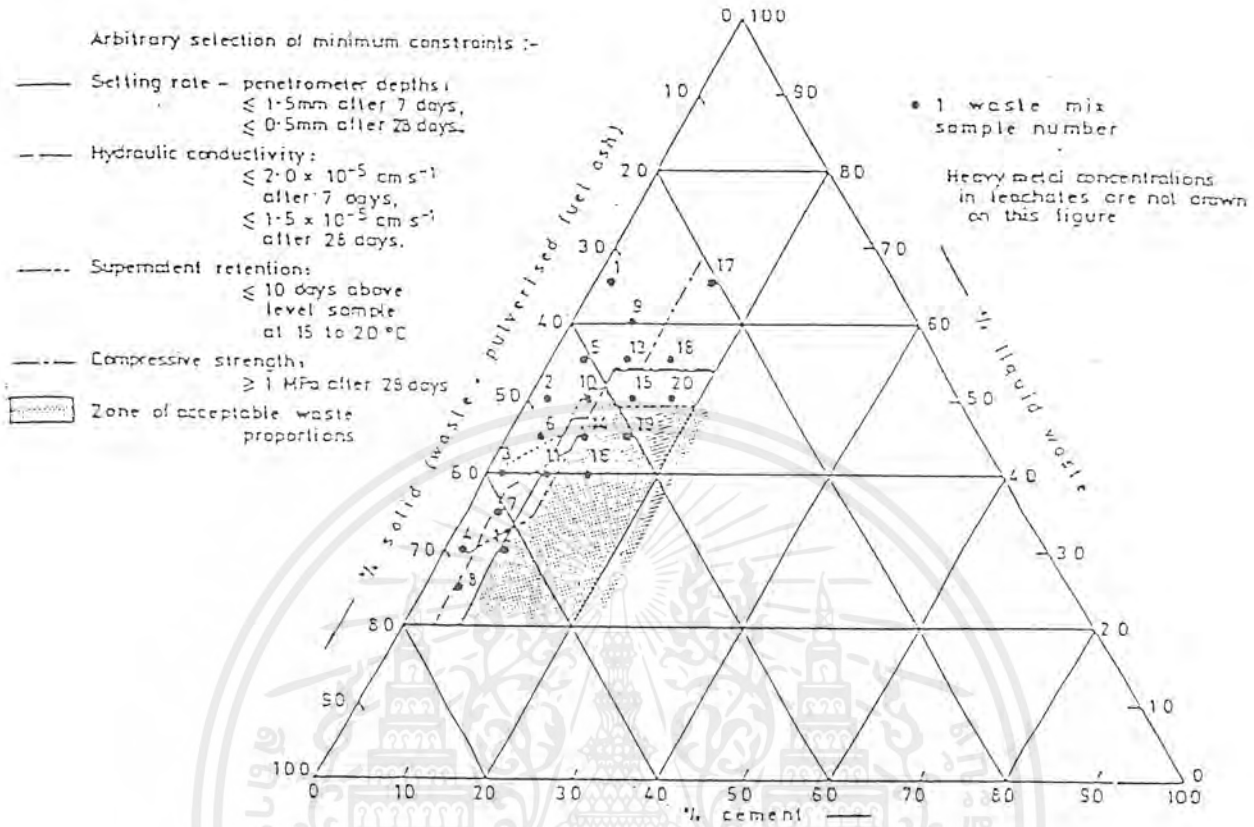
1.2 วารสารปริทัศน์

จากการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดของเสีย โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์เป็นดังนี้

Shively และคณะ (1986) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิค แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว โดยการทำให้เป็นก้อนจากนั้นจึงทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และการชะละลาย (Leaching Tests) ของโลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมกัน จาก ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่ระยะเวลาการบ่มตัว 14 วัน พบว่า เมื่อใช้อาร์เซนิค และแคดเมียมในการกำจัดโดยการทำให้เป็นก้อน จะทำให้กำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ลดลงทั้งกรณีที่ใช้ค่าอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ของเสียผสมจะลดกำลังรับแรงอัดเฉพาะค่า W/C 0.5 ส่วน โครเมียม และตะกั่ว นั้นจะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด สำหรับค่าความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมกัน พบว่า ความเข้มข้นของน้ำสกัดโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA ทั้งกรณีที่ใช้ W/C 0.5 และ 1.0 โดยค่าความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม W/C จาก 0.5 เป็น 1.0

Baldwin และคณะ (1987) ได้ทำการวิจัยการกำจัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับของเสียหลายชนิด จำแนกเป็น 2 จำพวก คือ พวกที่เป็นของเหลว (Liquid Waste) ได้แก่ Oxidized Solid Cyanide Waste (In Liquid Form), Oxidized Liquid Cyanide Waste และ Neutralized Acid/Alkali และ พวกที่เป็นของแข็ง (Solid Waste) ได้แก่ เถ้าลอยที่บดละเอียด (Pulverized Fly Ash) และขี้โลหะจากเตาหลอม (Metal Slags) ทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของก้อนซีเมนต์ที่ได้ เช่น การทดสอบ การชะละลาย (Leaching Test) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) อัตราการตกตัว (Setting Rate) ฯลฯ โดยใช้มาตรฐานการทดสอบจาก Standard Waste Research Unit Method จากผลการทดลองนำค่าอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ของเสียในรูปของเหลว และของเสียในรูปของแข็งมาเขียนกราฟ ทำให้สามารถทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้ ดังแสดงรายละเอียดดังภาพที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 1.1 : อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียด้วยการทำให้เป็นก้อน

[Baldwin และคณะ , 1987]

Shin และ Sujiwatthana (1988) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียอันตรายโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยใช้ของเสีย 4 ชนิด คือ แคดเมียม ตะกั่ว อัลดริน (Aldrin) และคลอเดน (Chlordane) จากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และการชะละลาย (Leaching Tests) พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเสียลงในส่วนผสม อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่เหมาะสมสำหรับ แคดเมียม ตะกั่ว อัลดริน และคลอเดน คือ 0.5 ซึ่งทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการทดสอบที่ W/C 0.25 และ 1.0 ส่วนระยะเวลาบ่มตัวที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นด้วย สำหรับค่าความสามารถในการถูกชะละลายปริมาณของเสียในน้ำสกัดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของเสียที่เติมลงไป ค่าความสามารถในการถูกชะละลายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อ pH ของสารที่ใช้สกัด (Extract Solution) มีค่าต่ำ หรืออัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (A/V ratio) มีค่ามากขึ้น และระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มตัวไม่มีผลมากนักต่อค่าความสามารถในการถูกชะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลาย ดังนั้นวิธีการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และซิลิกา จะเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก (แคดเมียม และตะกั่ว) ได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่ใช้ฆ่าแมลง (อัลดริน และคลอเดน)

Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยทดสอบค่าความสามารถในการถูกชะละลาย ค่าความเป็นด่างจากก้อนของเสีย 15 ครั้ง สามารถหาค่า Buffering Capacity ของของเสียดังกล่าวได้ 18.3 meq/g และจากการศึกษาค่าความสามารถในการถูกชะละลายโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว เพื่อศึกษาถึงกลไกของการยึดจับโลหะหนักในซีเมนต์แข็งตัว สรุปได้ว่า แคดเมียมจะอยู่ในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ และแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนหรือเกาะติดกับผนังของรูพรุนในซีเมนต์แข็งตัว ส่วนโครเมียมและตะกั่วมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิเกตเกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา

Shin และคณะ (1988) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะโดยการทำเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณของเสีย และปริมาณตัวตกตะกอน(Precipitator) พบว่า การชะละลายของโครเมียมและสังกะสีจะลดลง เมื่อลดค่าอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณตัวตกตะกอน สำหรับค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มตัว 14 วันจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณของเสียที่กำจัด และทำการวิเคราะห์โดยวิธี Anova Analysis พบว่า อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ จะมีผลต่อค่าความสามารถในการถูกชะละลายของโครเมียม สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีผลต่อค่าความสามารถในการถูกชะละลายของสังกะสี และค่ากำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ ส่วนการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ค่าใช้จ่าย ค่าความสามารถในการถูกชะละลายของโครเมียม และสังกะสีที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 5 ppm ของโครเมียมและสังกะสี และค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งมีค่าสูงกว่า 10 กก./ตร.ซม. จะได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดกากตะกอนแห้ง 30 กรัม ดังนี้คือ อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณตัวตกตะกอน เท่ากับ 1 , 1.5 และ 1.075 กรัม ตามลำดับ

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย

1.3.1เพื่อศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์โลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักผสม โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ (Cement Based Solidification)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2เพื่อศึกษาสัดส่วนผสมของโลหะหนัก และโลหะหนักผสมที่เหมาะสมในปูนซีเมนต์ต่อสมบัติกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

1.3.3เพื่อศึกษาระยะเวลาบ่มตัวของโลหะหนัก และโลหะหนักผสมที่เหมาะสมในปูนซีเมนต์ต่อสมบัติกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

1.4 ขอบเขตของโครงงานวิจัย

การวิจัยนี้จะใช้โลหะหนักแต่ละชนิด โดยทำการทดสอบโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ นิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม และใช้วัสดุประสาน คือ ปูนซีเมนต์ ทำการทดลองหล่อชิ้นงานซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย และโลหะหนักปริมาณต่าง ๆ และระยะเวลาบ่มตัวที่ต่างกัน เพื่อหากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของโลหะหนัก และโลหะหนักผสม โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทำลายฤทธิ์โลหะหนักดังนี้ คือ

1.4.1สัดส่วนผสมของโลหะหนักและโลหะหนักผสมต่อวัสดุประสาน

1.4.2ระยะเวลาบ่มตัว (Curing Time) ของก้อนซีเมนต์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงานวิจัย

1.5.1ทราบสัดส่วนผสมของโลหะหนัก โลหะหนักผสมต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาบ่มตัว (Curing Time) ที่เหมาะสมของก้อนปูนซีเมนต์จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

1.5.2ผลจากการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาของเสียประเภทโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการเคมีต่อไป

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัย

1.6.2 ทำการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการ

1.6.3 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการศึกษาทดลอง

1.6.4 เขียนรายงานและเสนอการศึกษาวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไปมีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23–92 ภายในคาบที่ 4–7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิปกติ) สมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) ได้หลายรูปซึ่งเสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะหนักเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ ผัก และผลไม้ จากนั้นเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้

โลหะหนักที่ทำการทดลอง ได้แก่ นิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ซึ่งอยู่ในรูปของแข็งมีสมบัติทางกายภาพ และเคมีของสารประกอบนิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม แสดงไว้ในตารางที่ 2.1–2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 : สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของนิกเกิล และสารประกอบนิกเกิล [Patty, 1962]

สารประกอบของนิกเกิล	สูตรเคมี	นน.อะตอม /โมเลกุล	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมเหลว (°ซ.)	จุดเดือด (°ซ.)	สมบัติการละลายน้ำ
นิกเกิล	Ni	85.7	8.90	1,455	2,900	ไม่ละลายในน้ำร้อน น้ำเย็น และกรดเจือจาง HNO_3 ละลายใน HCl และ H_2SO_4
นิกเกิลออกไซด์	NiO	74.69	7.45	1,990		ไม่ละลายในน้ำร้อนและน้ำเย็น ละลายใน NH_4OH, KCN
นิกเกิลฟอร์เมต	Ni $(CHO)_2$. $2H_2O$	184.76	2.154	สลายตัว		13 มก./ล. ละลายได้ในกรด และNH_4OH
นิกเกิลซัลเฟต	$NiSO_4$. $6H_2O$	262.85	2.07		(-$6H_2O$) 280	625 ก./ล. (20°ซ.) 3,470 ก./ล.(100°ซ.) ละลายได้ในแอลกอฮอล์ และ NH_4OH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 : สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสังกะสี และสารประกอบสังกะสี [Patty, 1962]

สารประกอบของสังกะสี	สูตรเคมี	นน.อะตอม /โมเลกุล	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมเหลว (°ซ.)	จุดเดือด (°ซ.)	สมบัติการละลายน้ำ
สังกะสี	Zn	65.38	7.14	419.47	907	ไม่ละลายในน้ำร้อนและน้ำเย็น ละลายในกรดอะซิติค และด่าง
ซิงค์ออกไซด์	ZnO	81.38	5.47	>1,800		1.6 มก./ล. (29°ซ.) ละลายได้ในกรดอะซิติคเจือจาง และ NH_4OH
ซิงค์ซัลไฟด์ (สพาลีไรท์)	ZnS	97.45	4.102 (25°ซ.)			0.65 มก./ล. (18°ซ.) ละลายได้ใน กรด
ซิงค์คลอไรด์	$ZnCl_2$	136.29	2.91 (25°ซ.)	262	732	4.32 กก./ล. (25°ซ.) 6.15กก./ล.(100°ซ.) 1 กก./ล. (12.5°ซ.) ในแอลกอฮอล์ ละลายได้ในอีเธอร์ ไม่ละลายใน NH_3
ซิงค์ซัลเฟต	$ZnSO_4$	161.44	3.74	สลายตัว 740		865 ก./ล. (25°ซ.) 808 ก./ล. (100°ซ.) ละลายได้ในแอลกอฮอล์ สลายตัวในน้ำเย็น แอลกอฮอล์ กรด และ อีเธอร์
ไดเมทิลซิงค์	$(CH_3)_2$ Zn	95.45	1.386	-42.2	46	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 : สมบัติทางกายภาพของโลหะตะกั่ว และสารประกอบตะกั่ว [Patty, 1962]

สารประกอบของตะกั่ว	จุดหลอมเหลว(°ซ.)	จุดเดือด (°ซ.)	สมบัติ การละลายน้ำ
โลหะตะกั่ว	327.4	1,525	ไม่ละลายในน้ำร้อนและน้ำเย็น ละลายในกรดอะซิติค และHNO_3
เลดอะซิเตท (แอนไฮดรัส)	280		443 ก./ล. ละลายได้ในน้ำเย็น และ2212 ก./ล. ละลายได้ในน้ำร้อน
เลดอาซาเนต (ยาฆ่าแมลง) โมโน, ได, เมทา และออโธ			ละลายในน้ำร้อน กรด และด่าง ไม่ละลายในน้ำเย็น
เลดเอไซด์	ระเบิดที่ 350		0.23 ก./ล. ละลายได้ในน้ำเย็น 0.9 ก./ล. ละลายได้ในน้ำร้อน และละลายในอะซิติค
เลดโบรไมด์	373	916	4.55 ก./ล. ละลายได้ในน้ำเย็น 47.1 ก./ล. ละลายได้ในน้ำร้อน ละลายในกรดและด่าง
เลดคาร์บอเนต (ตะกั่วขาว)	สลายตัว		ไม่ละลายในน้ำเย็น และน้ำร้อน ละลายในกรดและด่าง
เลดคลอไรด์	501	954	6.73 ก./ล. ละลายได้ในน้ำเย็น 33.4 ก./ล. ละลายได้ในน้ำร้อน ละลายในกรดและด่าง
เลดโครเมต (โครมเหลือง)	844	สลายตัว	0.0005 ก./ล. ละลายได้ในน้ำเย็น ละลายในกรด และด่าง ยกเว้นในกรดอะซิติค
เลดฟลูออไรด์	855	1,290	0.64 ก./ล. ละลายได้ในน้ำเย็น ละลายในกรด HNO_3 และH_2SO_4ไม่ละลายในด่าง
เลดไนเตรท	สลายตัวที่ 470	สลายตัว	388 ก./ล. ละลายได้ในน้ำเย็น 1,388 ก./ล. ละลายได้ในน้ำร้อน ละลายในกรดและด่าง
เลดซีควิออกไซด์	สลายตัวที่ 360	สลายตัว	ละลายในกรดและด่าง ไม่ละลายในน้ำเย็น สลายตัวในน้ำร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 : สมบัติทางกายภาพของโลหะตะกั่ว และสารประกอบตะกั่ว [Patty, 1962] (ต่อ)

สารประกอบของตะกั่ว	จุดหลอมเหลว(°ซ.)	จุดเดือด (°ซ.)	สมบัติ การละลายน้ำ
เลดออกไซด์ (ตะกั่วแดง)	สลายตัวที่ 500	สลายตัว	ละลายในกรด ไม่ละลายในน้ำร้อน น้ำเย็น และด่าง
เลดโมโนออกไซด์	888		0.017 ก./ล. ละลายได้ในน้ำเย็น ละลายในด่าง
เลดซับออกไซด์	สลายตัว		ละลายในกรด และด่าง ไม่ละลายในน้ำเย็น
เลดไดออกไซด์ (เพอร์รอกไซด์)	สลายตัวที่ 290		ละลายในกรด และด่าง ไม่ละลายในน้ำร้อน และน้ำเย็น
เลดซิลิเกต (กระจกผิวเรียบ)	766		ละลายในด่าง สลายตัวในกรด ไม่ละลายในน้ำเย็น
เลดซัลเฟต	1,170	0.0028	0.0056 ก./ล. ละลายได้ในน้ำเย็น ละลายในกรด ยกเว้นกรดอะซิติค
เลดซัลเฟต (เดิม)	977	0.0044	ละลายในกรด H_2SO_4
เลดซัลไฟด์	1,114		ละลายในกรด ไม่ละลายในด่าง และน้ำเย็น (ตามธรรมชาติ)
เลดเตทตระเอททิล	-130	$\pm$ 200	ไม่ละลายในกรด ด่าง น้ำร้อน และน้ำเย็น
เลดเตทตระเมททิล	-27.5	$\pm$ 110	ไม่ละลายในกรด ด่าง น้ำร้อน และน้ำเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 : สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม และสารประกอบแคดเมียม [Patty, 1962]

สารประกอบของแคดเมียม	สูตรเคมี	นน.อะตอม /โมเลกุล	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมเหลว (°ซ.)	จุดเดือด (°ซ.)	สมบัติการละลายน้ำ
แคดเมียม	Cd	112.41	8.642	320.9	767 ± 2	ไม่ละลายในน้ำร้อนและน้ำเย็น ละลายใน NH_4NO_3
แคดเมียมออกไซด์	CdO	128.41	6.95	> 1,426	สลายตัวที่ 900 - 1,000	ไม่ละลายในน้ำร้อนและน้ำเย็น ละลายใน เกลือ NH_4
แคดเมียมคลอไรด์	$CdCl_2$	183.32	4.047 (25°ซ.)	568	960	1.4 กก./ล. (20°ซ.) 1.5 กก./ล. (100°ซ.) 15.2 ก./ล. ใน แอลกอฮอล์ ไม่ละลายใน อะซีโตน และอีเธอร์
แคดเมียมไนเตรท	Cd $(NO_3)_2$	236.43		350		1.09 กก./ล. (0°ซ.) 3.26 กก./ล. (60°ซ.) ละลายในกรด
แคดเมียมซัลไฟด์	CdS	144.48	4.82	1,750 (100atm)		1.3 มก./ล. (18°ซ.) เป็นคลอลอยด์ในน้ำร้อน ละลายใน NH_4OH และกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ (Cement) หมายถึง วัสดุยึดเกาะที่สามารถเกิดพันธะกับชิ้นส่วนหรืออนุภาคของสารที่เป็นของแข็งในสัดส่วนที่เหมาะสม [Soroka, 1979] การให้คำจำกัดความนี้เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางของวัสดุหลายชนิด แต่วัตถุประสงค์ในเชิงวิศวกรรมและการก่อสร้าง ต้องการปูนซีเมนต์ที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcareous Cement) หรือปูนขาวเป็นโครงสร้างหลัก ซึ่งโดยทั่วไปปูนซีเมนต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ปูนซีเมนต์ที่ไม่สามารถก่อตัวหรือแข็งตัวในน้ำ หรือไม่เสถียรในน้ำ เรียกว่า Non-Hydraulic Cement

2. ปูนซีเมนต์ที่สามารถก่อตัวหรือแข็งตัวในน้ำ และให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งซึ่งเสถียรในน้ำ เรียก Hydraulic Cement เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการวิจัยนี้เป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ เรียก ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ดังนั้นปูนซีเมนต์ที่เลือกใช้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cenent)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cenent) คือ วัสดุซีเมนต์ซึ่งได้มาจากการผสมให้เข้ากันของสารที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต หรือวัสดุปูนขาวทนทานอื่น ๆ พร้อมทั้งสารที่ประกอบด้วยสารดินเหนียว (Argillaceous) และ/หรือ วัสดุอื่น ๆ เช่น ซิลิกา อลูมินา หรือเหล็กออกไซด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติให้เป็นไปตามต้องการ จากนั้นทำการเผาจะเกิดปฏิกิริยาเคมีและรวมตัวเป็นสารประกอบ ได้ปูนซีเมนต์เม็ด หรือปูนเม็ด (Clinker) แล้วจึงลดอุณหภูมิให้เหมาะสม (Clinkering Temperature) โดยการทิ้งไว้หรือใช้เครื่องทำให้เย็น (Clinker Cooler) ก่อนนำไปบดละเอียด (Grinding) ให้สามารถผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 ได้หมด

2.2.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีด้วยกัน 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) และไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tricalcium Aluminoferrite) ดังตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 : สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [วินิต, 2529]

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3CaO.SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2CaO.SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
ไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่น ๆ คือ MgO, TiO_2, Mn_2O_3, K_2O และ Na_2O ซึ่งปะปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูน โดยสารประกอบแต่ละชนิดจะแสดงพฤติการของสมบัติแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 : ลักษณะของสารประกอบที่เกิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [พิภพ, 2532]

สมบัติที่เกิด	พฤติการสัมพันธ์ของสารประกอบ			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราของปฏิกิริยา (Reaction)	ปานกลาง	ช้า	เร็ว	ช้า
ความร้อนต่อหน่วยของสารประกอบ	ปานกลาง	เล็กน้อย	มาก	เล็กน้อย
ค่าการยึดติด (Cementing) ต่อหน่วยสารประกอบ				
- ก่อน (Early)	ดี	ไม่ดี	ดี	ไม่ดี
- หลังสุด (Ultimate)	ดี	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี

2.2.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จำนวนเปอร์เซนต์ของสารประกอบพื้นฐานแต่ละชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามการผลิตทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะแตกต่างกันแบ่งได้ 5 ประเภทดังนี้ คือ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement)
3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (High–Early Strength Portland Cement)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (Low–Heat Portland Cement)
5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate–Resistant Portland Cement)

โดยปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณสารประกอบพื้นฐาน แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 : จำนวนสารประกอบพื้นฐานที่รวมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละชนิด [พิภพ, 2532]

ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ปริมาณสารประกอบ (%)				ความละเอียด *
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	ตร.ซม./ก.
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา	50	24	11	8	1,800
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง	42	33	5	13	1,800
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว	60	13	9	8	2,600
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ	26	50	5	12	1,900
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง	40	40	4	4	1,900

* ทดสอบความละเอียดโดย Wagner Turbidimeter Test

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) หรือบางที่เรียก ปูนซีเมนต์มาตรฐาน (Standard Portland Cement) เนื่องจากปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐาน เพื่อจะได้ทราบถึงความแตกต่างของปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นมาภายหลัง เหมาะสำหรับใช้ในงานทั่วไปที่ไม่ต้องการความพิเศษ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคเศียรเดียว ตราเพชร ตราพญานาค 7 เศียร และตราปลาฉลาม เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) ตราช้าง

(ข) ตราพญานาคเศียรเดียว

(ค) ตราเพชร

(ง) ตราพญานาค 7 เศียร

(จ) ตราปลาฉลาม

ภาพที่ 2.1 : ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา [พงศ์พัน, 2535]

2.2.3 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

ปูนซีเมนต์ที่ผลิตเสร็จแล้วจะต้องมีคุณภาพสม่ำเสมอ และเป็นไปตามที่มาตรฐานที่กำหนดไว้ มาตราฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดสมบัติทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ดังตารางที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 : สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา [วินิต, 2529 และ* พิภพ, 2532]

สมบัติทางเคมี	มาตรฐาน	ตราเพชร *
ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงสุด (%)		21.25
ปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สูงสุด (%)		5.77
ปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) สูงสุด (%)		3.13
ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) สูงสุด (%)	5.00	1.08
ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) สูงสุด (%)		
- มี $3CaO.Al_2O_3$ 8% หรือน้อยกว่า	2.50	-
- มี $3CaO.Al_2O_3$ มากกว่า 8%	3.00	2.36
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) สูงสุด (%)	3.00	0.71
กากที่ไม่ละลายในด่าง (Insoluble Residue) สูงสุด (%)	0.75	0.40

ตารางที่ 2.9 : สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา [วินิต, 2529 และ* พิภพ, 2532]

สมบัติทางกายภาพ	มาตรฐาน	ตราเพชร *
1. ความละเอียด (Fineness) พื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) ตร.ซม./ก. (เลือกวิธีทดสอบได้)		
1.1 ทดสอบด้วยเทอร์บิดิมิเตอร์ (Turbidimeter Test, Wagner)		
- ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตร.ซม./ก.	1,600	3,000
- ค่าเฉลี่ยต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง ตร.ซม./ก.	1,500	2,800
1.2 ทดสอบด้วยแอร์เพอมีอะบิลิตี (Air Permeability Test, Blaine)		
- ค่าเฉลี่ยต่ำสุด ตร.ซม./ก.	2,800	-
- ค่าเฉลี่ยต่ำสุดสำหรับตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่ง ตร.ซม./ก.	2,600	-
2. ความอยู่ตัว (Soundness)		
การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟว์ (Autoclave Expansion) สูงสุด (%)	0.80	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.9 : สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา [วินิต, 2529 และ* พิภพ, 2532] (ต่อ)

คุณสมบัติทางกายภาพ	มาตรฐาน	ตราเพชร *
3. ระยะเวลาก่อตัว (Time of Setting) (เลือกวิธีทดสอบได้)		
3.1 ทดสอบแบบกิลโมร์ (Gillmore Test)		
- การก่อตัวระยะต้น (Initial Set) ไม่น้อยกว่า (นาที)	60	-
- การก่อตัวระยะปลาย (Final Set) ไม่มากกว่า (นาที)	10	-
3.2 ทดสอบแบบไวแคต (Vicat Test)		
- การเริ่มก่อตัว ไม่น้อยกว่า (นาที)	45	2 ชม.
4. ปริมาณอากาศในมอร์ต้า (Air Content of Mortar) เมื่อเตรียมและทดสอบตามวิธีมาตรฐานโดยปริมาตรสูงสุดไม่มากกว่า (%)	12	
5. กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) กำลังรับแรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้า (Mortar Cube) ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐานที่ร่อนได้ตามขนาด (Graded Standard Sand) 2.75 ส่วนโดยน้ำหนัก เตรียมและทดสอบตามวิธีมาตราฐาน ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์อายุข้างล่างนี้		
1 วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	85	170
1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	150	250
1 วันในอากาศชื้น 27 วันในน้ำ (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	245	360
6. การก่อตัวผิดปกติ (False Set) ระยะจมสุดท้าย (Final Penetration) สูงสุด (%)	50	

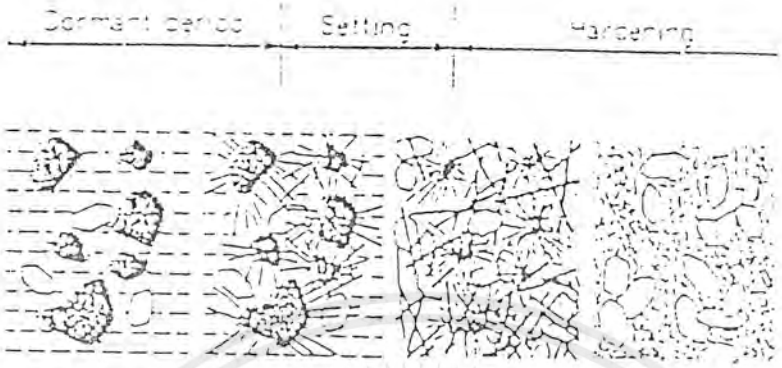
2.2.4 ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

การเติมน้ำในปูนซีเมนต์ผงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ เรียกส่วนผสมในช่วงนี้ว่า ซีเมนต์ Paste ซึ่งในช่วงเวลา 2-3 นาทีหลังจากเติมน้ำจะเกิดผลึกคล้ายเข็มของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรตโดยจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เรียกการทำให้ซีเมนต์ Paste แข็งตัว (Stiffening) นี้ว่า การตกตัว (Setting) และเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมงจะเริ่มเกิดผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขนาดใหญ่ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ขนาดเล็ก โดยมีน้ำกระจายเข้าไปในโครงผลึก และรอบ ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37630

เรียกว่า การยึด (Hardening) แสดงดังภาพที่ 2.2 ซึ่งกำลังรับแรงอัดของ Paste จะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการยึด



ภาพที่ 2.2 : ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในซีเมนต์ Paste [Saroka, 1979]

โดยจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ไฮเดรชั่น (Hydration) ยังผลให้เกิดความเหนียว และเกาะแน่นกับวัสดุผสม ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา เรียกว่า Heat of Hydration วัดเป็นแคลอรีต่อกรัมของปูนซีเมนต์ ซึ่งบางส่วนจะหนีผ่านเนื้อคอนกรีตออกมา แต่บางส่วนจะอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ถ้าความร้อนที่เกิดภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูงจะทำให้คอนกรีตเสียความแข็งแรง และเกิดหน่วยแรงต่าง ๆ ภายในเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว

ตัวอย่างของปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้ คือ

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

$$2(3CaO.\ SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO\ .\ 2SiO_2\ .\ 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

$$2(2CaO.\ SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO\ .\ 2SiO_2\ .\ 3H_2O + Ca(OH)_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

$$3CaO.Al_2O_3 + CaSO_4.2H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.3H_2O$$

4. ไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

$$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + CaSO_4.2H_2O.Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO(Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4$$

จากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำจะก่อให้เกิดสภาพด่างในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีความสามารถในการทำให้ซีเมนต์เป็นกลาง โดยการตกตะกอนแคลเซียมซิลิเกตที่ไม่ละลายในรูปของแม่พิมพ์ซีเมนต์เมื่อความเข้มข้นแคลเซียมมากกว่า 100 มก./ล. และ pH มากกว่า 11 ซึ่งซีเมนต์ Paste ที่มีความเป็นด่างสูงด้วยผิวซิลิกา และออกซีไฮดรอกไซด์ (Shively, 1986) สามารถพบได้ในสิ่งแวดล้อม สำหรับการตกตะกอนโลหะที่มีฤทธิ์เป็นกรด หรือ เป็นด่าง และปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) เชิงซ้อน พบว่า โลหะหนักจะถูกดูดซับบนผิวซิลิกา และเหล็กออกซีไฮดรอกไซด์ โดยแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการดูดซับโลหะสูง แต่ซีเมนต์ Paste อาจไม่ก่อตัวเป็นสารประกอบเนื่องจากการไม่ละลายของปูนขาว และอลูมินาบางส่วน ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ กับน้ำในธรรมชาติส่วนใหญ่ แต่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกับสารละลายกรด กลไกคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของแร่ที่มีความเข้มข้นของซิลิกาอยู่มากในสิ่งแวดล้อม ในวัสดุที่เป็นซีเมนต์อื่น ๆ ก็เช่นเดียวกัน คือ เกิดปฏิกิริยาคล้ายคลึงกัน แต่จะมีความแตกต่างในส่วนประกอบทำให้ Stoichiometry ของผลิตภัณฑ์มีหลายชนิด

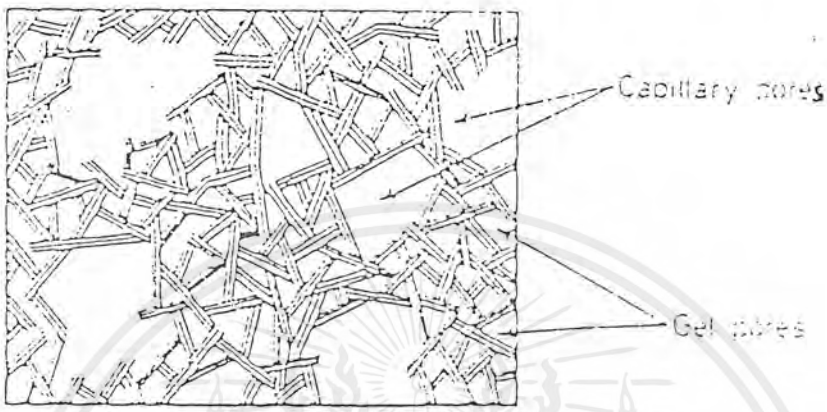
การทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำจะหยุดเมื่อน้ำหนีออกจากซีเมนต์ Paste หมดแล้ว ดังนั้นการบ่มตัวจึงเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีตที่สำคัญ เวลาที่ใช้เพื่อให้การทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำเป็นไปอย่างสมบูรณ์ขึ้นกับ ปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดของปูนซีเมนต์ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ และอุณหภูมิโดยรอบ แต่ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า 0.55 โดยน้ำหนัก จะขึ้นอยู่กับการให้น้ำจากภายนอกด้วย

2.2.5 ช่องว่างของซีเมนต์ Paste

ซีเมนต์ Paste ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจะประกอบด้วย น้ำ รูพรุนซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่มอย่างชัดเจน คือ รูพรุนเจล (Gel Pores) และรูพรุนขนาดเล็ก (Capillary Pores) แสดงดังภาพที่ 2.3 โดยรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พรุนเจลเกิดขึ้นในรูปของอนุภาคขนาดคอลลอยด์ มีลักษณะเป็นรูพรุนประมาณ 28% ของปริมาณน้ำเริ่มต้น ส่วนปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเจล จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เริ่มต้น และระดับของปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

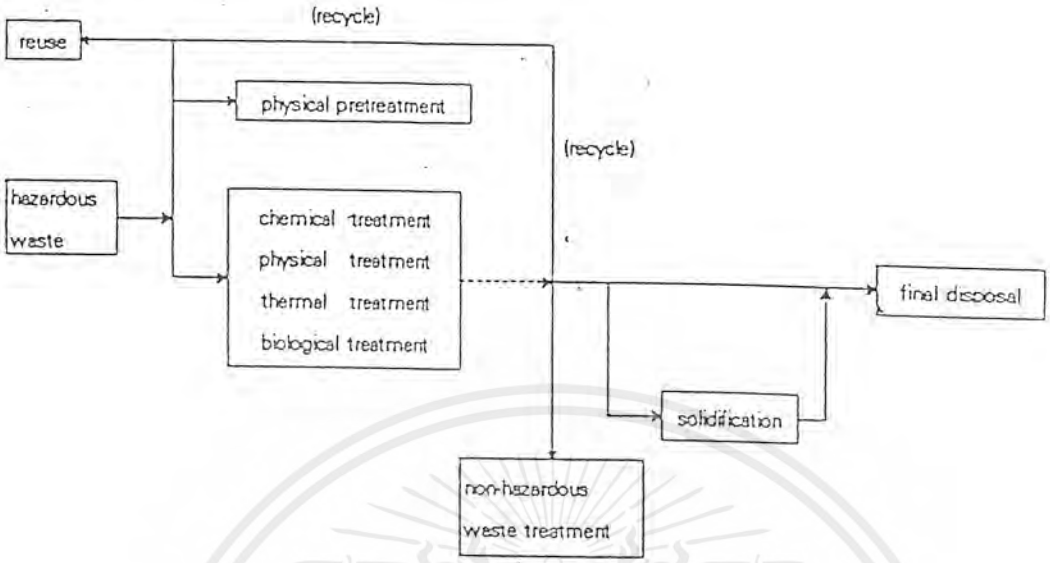


ภาพที่ 2.3 : โครงสร้างของซีเมนต์ Paste [Saroka, 1979]

2.3 การบำบัดและการกำจัดของเสียอันตราย

ขั้นตอน และกระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายซึ่งประกอบด้วย กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment) กระบวนการบำบัดทางความร้อน (Thermal Treatment) และกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) รวมถึงการทำให้เป็นก้อน (Solidification) และการกำจัดขั้นสุดท้าย (Final Disposal) แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 : กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตราย [Tsai and Hsu , 1985]

2.4 การกำจัดของเสียอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน (Solidification of Hazardous Wastes)

2.4.1 นิยามของ Solidification

กระบวนการทำให้เป็นก้อน (Solidification) และการทำลายฤทธิ์ (Stabilization) จะใช้ร่วมกันในการอธิบายถึงระบบที่ทำให้สารต่าง ๆ ถูกยึดไว้ และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติทางเคมีออกมาได้ โดยการทำให้เป็นก้อน คือ กิจกรรมซึ่งทำให้สารที่กระจัดกระจาย หรือตะกอน หรือองค์ประกอบของสารเหล่านี้ถูกนำมารวมกันเพื่อทำให้เกิดเป็นมวลแข็งตัวขึ้น [Anderson และคณะ, 1979]

การทำให้เป็นก้อนเป็นกระบวนการบำบัดของเสียอันตรายเพื่อจำกัดความเป็นพิษของของเสีย โดยทั่วไป ของเสียอันตรายจะถูกยึดติดด้วยกระบวนการทางเคมี หรือทำให้ดูดติดทางกายภาพ โดยการผสมสารเคมีบางชนิดลงไป ซึ่งวิธีการทำลายฤทธิ์ดังกล่าวนี้ถูกออกแบบมาเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของของเสียเกี่ยวกับการขนส่ง การเคลื่อนย้าย การลดพื้นที่ผิวของของเสีย และจำกัดการปนเปื้อนของสารมลพิษที่ปล่อยออกมาจากของเสีย [Sheffield และคณะ, 1986]

ในระยะแรกนั้นกระบวนการทำให้เป็นก้อนได้ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับของเสียที่เป็นสารกัมมันตภาพรังสีที่ไม่ว่องไวโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของของเสียให้สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนย้ายไปยังสถานที่กำจัดได้ และได้มีการเลือกกระบวนการในการบรรจุ เก็บของเสียกัมมันตภาพรังสีในระยะยาว วัสดุที่มีสมบัติแข็งตัวได้ที่เลือกใช้จะต้องมีสมบัติดังนี้ [Thomson, 1979]

1. ลดความสามารถในการแผ่รังสี
2. ไม่ถูกย่อยสลาย
3. เมื่อนำไปบรรจุของเสียจะไม่สามารถชะละลายของเสียออกมาได้

วัสดุที่มีสมบัติตรงตามต้องการดังกล่าว คือ ปูนซีเมนต์ผสม เรซิน แก้ว Bituminous Material และ Urea Formaldehyde

การทำให้เป็นก้อนของของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม จะแตกต่างจากของเสียที่มีกัมมันตภาพรังสี ทั้งนี้เนื่องจากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม จะมีปริมาณมาก มีความเป็นพิษปานกลาง และมีสมบัติไม่สม่ำเสมอ [Bahadir และคณะ, 1987]

กระบวนการทำให้เป็นก้อนที่ใช้สำหรับการกำจัดของเสียประกอบด้วย Cement Based Techniques, Lime Based Techniques (Pozzolanic), Thermoplastic Techniques (Bitumen, Paraffin and Polyethylene), Organic Polymer, Surface Encapsulation, Self-Cementing Techniquesc และ Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics [Shively และคณะ, 1986]

เทคนิคการทำให้เป็นก้อนแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ Porous Systems และระบบ Monolithic Systems ซึ่งแตกต่างกันที่ความสามารถทนทานต่อน้ำ โดยวิธีการ Cement Based Techniques และ Lime Based Techniques จัดเป็นระบบ Porus Systems จึงอาจมีการถูกละลายสารต่าง ๆ ออกมาได้ เนื่องจากวัสดุแข็งตัวที่ใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ คือ ฝุ่นซีเมนต์จากเตา ซิลิเกตที่สามารถละลายน้ำ เถ้าลอย ขี้โลหะจากเตาหลอม ปูนขาว Bituminous asphalt และสารโพลิเมอร์ ส่วนระบบ Monolithic Systems จะสามารถป้องกันการซึมแพร่ของน้ำได้

กระบวนการทำให้เป็นก้อนของสารอันตราย สารพิษ และของเสียที่กำจัดยากมีข้อกำหนดดังนี้ [Barnes และคณะ, 1979]

1. สารพิษทั้งหมดในของเสียควรมีสมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี และสามารถถูกจับยึดไว้ในของเสียได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ของเสียควรจะเป็นมวลแข็งที่น้ำและแสงไม่สามารถผ่านได้ และมีพื้นที่ผิวที่สามารถสัมผัสกับน้ำได้น้อยที่สุด
3. มวลของแข็งควรจะมีสมบัติดังนี้
   - มีความคงตัวตามลักษณะขนาด
   - มีความทนทานต่อน้ำหนัก และแรงกดได้ดี
   - มีสมบัติของ การเปียก/แห้ง (Wet/Dry) และการแข็งตัว/การหลอมเหลว (Freeze/Thaw) ที่ดี
   - การซึมของน้ำน้อย
   - น้ำชะ (Leachate) และน้ำไหล (Runoff) ควรอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน
4. สถานที่ที่ใช้สำหรับกำจัดสามารถใช้ประโยชน์ได้หลังจากทิ้งของเสียแล้ว

2.4.2 กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์ (Solidification and Stabilization Process)

กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์ เป็นวิธีการที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการละลายของสารเคมีที่เป็นของเสียอันตรายและการปนเปื้อนของสารพิษลงสู่สิ่งแวดล้อม วัตถุประสงค์ของกระบวนการดังกล่าว เพื่อสร้างมวลของแข็งเนื้อเดียวที่มีความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้เล็กน้อยและมีโครงสร้างที่มั่นคงแข็งแรง โดยกำหนดหลักสำคัญ 4 ข้อ ในการบำบัดของเสียอันตรายดังนี้

1. ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียให้เหมาะสมในการเคลื่อนย้ายของเสีย
2. การลดพื้นที่ผิวของของเสียเพื่อป้องกันหรือลดการสูญเสียสารมลพิษ
3. การจำกัดการละลายของสารมลพิษที่อยู่ในของเสีย
4. การกำจัดสารมลพิษออกจากของเสีย

กระบวนการทำให้เป็นก้อนประเภทต่าง ๆ มีด้วยกัน 7 วิธี ได้แก่ Cement Based Techniques, Lime Based Techniques (Pozzolanic), Thermoplastic Techniques (Bitumen, Paraffin and Polyethylene), Organic Polymer, Surface Encapsulation, Self–Cementing Techniques และ Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ **2.10** : กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน [Engineering and Science Co.Ltd., 1986]

กระบวนการทำให้เป็นก้อน (Solidification)	รายละเอียด
1.Cement Based Techniques	ของเสียจะถูกผสมลงในซีเมนต์ น้ำและส่วนผสมอื่น ๆ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัว เป็นก้อนซีเมนต์
2.lime Based Techniques (Pozzolanic)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีสมบัติเป็นโพซโซลาน เช่น เถ้าลอย ผงซีเมนต์ที่เตาเผา เป็นต้น ซึ่งมีสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำ ผสมน้ำแล้วปล่อยให้แข็งตัว
3.Thermoplastic Techniques	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น Bitumen Paraffin หรือ Polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว
4.Organic Polymer	ของเสียในชั้นแรกจะถูกผสมกับสารโพลีเมอร์ (Gelling Agents Urea Formaldehyde) และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมให้เข้ากันก่อนที่สารโพลีเมอร์จะแข็งตัว
5.Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันให้แน่นแล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยสารเฉื่อย เช่น Polyethylene หรือ Organic Resins
6. Self-Cementing Techniques	สารที่มีสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซัลเฟต และ แคลเซียมซัลไฟต์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย
7.Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสารกัมมันตภาพรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้วหรือ Synthetic Silicate Mineral เพื่อป้องกันไม่ให้สารอันตรายนี้ถูกชะละลายด้วยน้ำ สามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีขบวนการหุ้มหรือบรรจุเป็นครั้งที่ 2

การเลือกวิธีการบำบัดของเสียดังกล่าวควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่าง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของของเสียและคุณสมบัติเฉพาะของของเสียสำหรับตะกอนโลหะหนักนั้นสามารถจะกำจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้หลายวิธีเช่น Cement Based Techniques, lime Based Techniques, Thermoplastic Techniques, Surface Encapsulation และ Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics

สำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี มีข้อดีและข้อเสีย [Shukrow และคณะ, 1982] ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 : เปรียบเทียบกระบวนการและข้อดี ข้อเสียของการกำจัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน [Shukrow และคณะ, 1982]

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1.Cement Based Techniques	Chemical Fixation Solidification	แบบแห้งหรือเปียก (โดยทั่วไปเหมาะกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	- วัสดุที่ใช้มีราคาถูก - มีความทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี - กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดี - เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างดีแล้ว	- ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ซีเมนต์ และของเสียที่แข็งตัวแล้วถูกชะล้างได้ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ - เพิ่มน้ำหนัก และขนาดของของเสีย และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการฝังกลบ
2.Lime Based Techniques	Chemical Fixation/ Solidification	แบบแห้งหรือเปียก (เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	- วัสดุที่ใช้ผสมมีราคาถูก - เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างดีแล้ว - การใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยขบวนการเดียวกัน	- เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 : เปรียบเทียบกระบวนการและข้อดี ข้อเสียของการกำจัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน [Shukrow และคณะ, 1982] (ต่อ)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
3.Thermoplastic Techniques	Physical Fixation	แบบแห้ง (เหมาะกับสารอนินทรีย์)	- สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี - สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก	- ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความชำนาญ - ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ - ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidant, Dehydrated Salts
4.Organic Polymer	Physical Fixation	แบบแห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	- ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer 's matrix - ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง	- ของเสียจะถูกยึดไว้ใน Polymer อย่างหลวม ๆ - สารที่มีค่า pH ต่ำ จะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น - การย่อยสลายทางชีวะของสาร Polymer บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 : เปรียบเทียบกระบวนการและข้อดี ข้อเสียของการกำจัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน [Shukrow และคณะ, 1982] (ต่อ)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
5.Surface Encapsulation	Chemical Containment	แบบแห้งหรือเปียก	- ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี - ไม่มีการชะล้างของเสียออกมา เมื่อสารที่ห่อหุ้มอยู่ไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการทำงานต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ	- การชะล้างของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่หุ้มถูกทำลาย - ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียจำนวนมาก ๆ
6.Self Cementing	Chemical Fixation	แบบแห้งหรือเปียก	- กระบวนการนี้ต้องการสารเติมในส่วนผสมซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก	- สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลาย และถูกชะล้างได้ภายใต้สภาวะที่มีค่า pH ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 : เปรียบเทียบกระบวนการและข้อดี ข้อเสียของการกำจัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน [Shukrow และคณะ, 1982] (ต่อ)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
7.Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	Physical Fixation	แบบแห้ง	- ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก - การบรรจุ หรือห่อหุ้มอยู่ในเกณฑ์ดี - ใช้วัสดุที่มีราคาถูก	- อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียอื่นระเหยออกมา - ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อน อุปกรณ์ และต้องการผู้ชำนาญงานเฉพาะ - ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกัมมันตภาพรังสี และสารที่มีพิษมาก ๆ

2.4.3. การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cerment Based Technique)

กระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ ประกอบด้วยการผสมของเสียกับปูนซีเมนต์และสารอื่นที่เติมลงไป ได้แก่ เถ้าลอย ซิลิเกต ซัลไฟด์ ฯลฯ โลหะหนักหลายชนิดในของเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซิลิเกตซึ่งไม่ละลายน้ำ ในสภาพแวดล้อมซึ่งมีความเป็นด่างสูงมากในปูนซีเมนต์และจะถูกจับไว้ให้อยู่ภายในรูพรุนของส่วนผสมปูนซีเมนต์ [Bishop, 1988] สรุปข้อดีและข้อเสียได้ดังนี้

ก. ข้อดี

1. สารที่เติมในส่วนผสมมีเพียงพอสำหรับอัตราส่วนที่ใช้
2. เทคนิคการผสมปูนซีเมนต์ และการกำจัดได้มีการพัฒนามาอย่างดีแล้ว
3. วิธีการนี้จะสามารถทนต่อสารเคมีหลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
4. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการมีอยู่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความแข็งแรงและความสามารถให้น้ำซึมผ่านของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแข็งตัวสามารถปรับได้โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงในของเสีย

6. วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

ข. ข้อเสีย

1. ไม่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดซึ่งจะทำลายกลไกการแข็งตัวของซีเมนต์

2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ

3. การเพิ่มน้ำหนักของของเสีย โดยการหล่อด้วยซีเมนต์จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสียไปกำจัดเพิ่มขึ้น

2.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของซีเมนต์

2.5.1 กำลังอัดของคอนกรีต

สมบัติของคอนกรีตที่ยังอยู่ในสภาพเหลวมีความสำคัญในขณะก่อสร้างเท่านั้น แต่สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งในทางปฏิบัติ สมบัติของคอนกรีตทั้ง 2 ลักษณะ จะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้ได้สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลว มีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. กำลังมอร์ต้า

กำลังของมอร์ต้ามีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยขึ้นกับความพรุนภายในเนื้อมอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ปริมาณ กำลัง ลักษณะผิว ขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแร่ธาตุต่าง ๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำลัง และโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

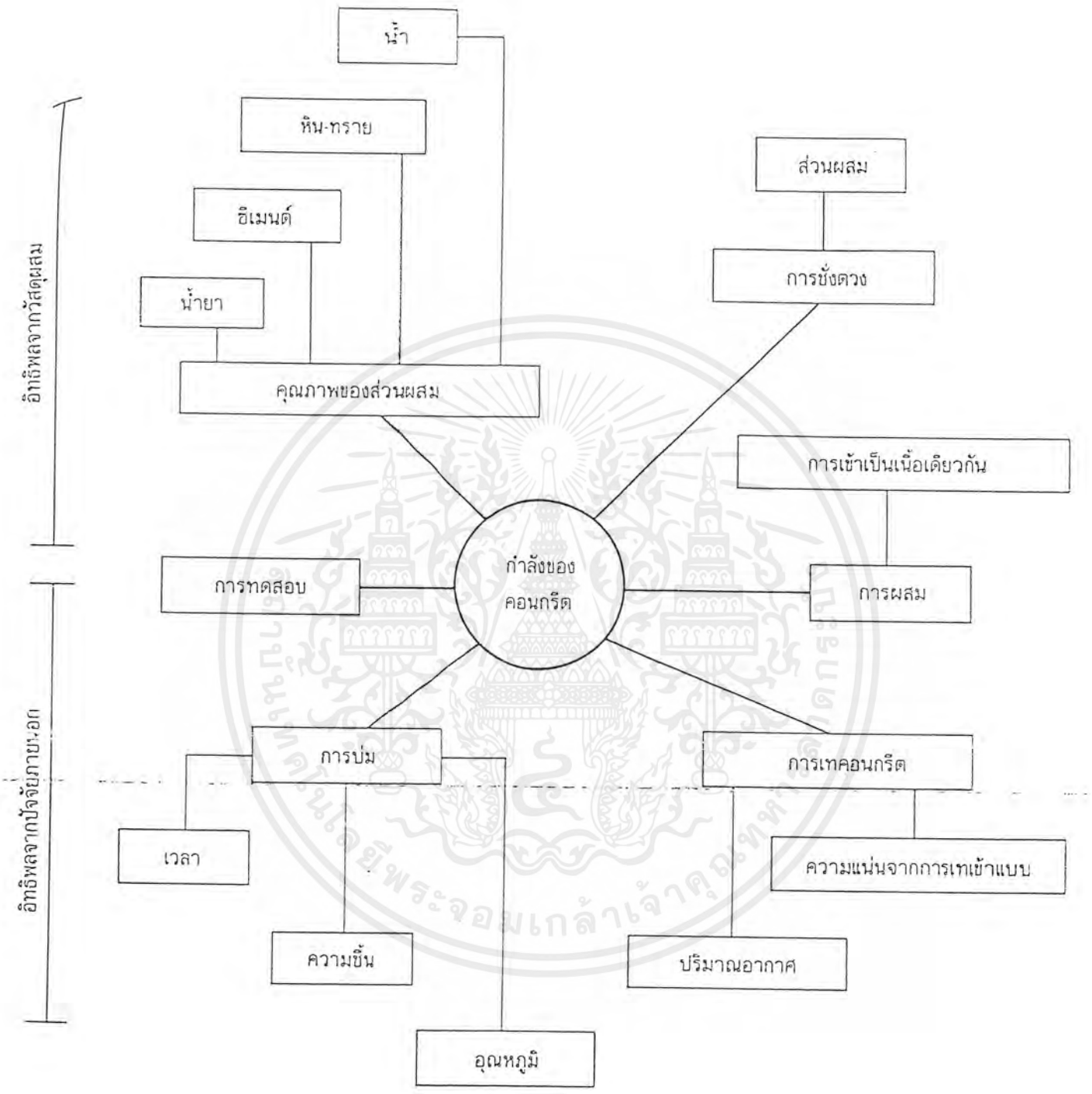
สำหรับกำลังของมอร์ต้าที่กำหนดให้ ความสามารถต้านแรงคอนกรีตจะขึ้นกับกำลังของหิน และแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้า ซึ่งเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในหินขนาดใหญ่จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้าลดลง เนื่องจากเกิดน้ำในหินได้มากขึ้น และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปานกลาง ขนาดของมวลรวมจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง รวมทั้งการเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมก็ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นด้วย

3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับผิวของมวลรวม

แรงยึดเหนี่ยวขึ้นกับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และลักษณะทางเคมี คือ ปฏิบัติเคมีระหว่าง ปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่าง ๆ นอกจากนี้ ทิศทางในการหล่อ และทิศทางในการให้น้ำหนัก ก็มีผลต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน เนื่องจากจะเกิดช่องว่างทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ต้าต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 : สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือ วิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำโดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการ คือ

1. ป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต
2. รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ

1. เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน
2. เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่ม อาจหมายถึงการควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียในระยะยาว

2.5.3 การผันแปรของกำลังอัดคอนกรีต

ความผันแปรของกำลังอัดคอนกรีตในโครงสร้างที่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งหรืออาจเป็นการผสมกันของหลาย ๆ สาเหตุ ได้แก่

1. ใช้สัดส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม
2. ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
3. ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดี
4. การผสมไม่ดีพอ
5. มีสารอินทรีย์ต่าง ๆ มากเกินข้อกำหนด
6. ใช้หินทรายที่สกปรก
7. ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
8. ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
10. การบ่มไม่เพียงพอ
11. การลำเลียง และการทดสอบไม่ถูกต้อง
12. อุณหภูมิผันแปรไป

2.5.4 ความเสียหายของคอนกรีต

คอนกรีตในโครงสร้างต่าง ๆ อาจเกิดความเสียหายหรือขาดความทนทานอันเนื่องจากสภาพแวดล้อมหรือสภาพการใช้งานที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม ความเสียหายอาจเกิดขึ้นเมื่อเริ่มใช้งานหรือบางครั้งอาจเกิดขึ้นหลังจากใช้งานโครงสร้างคอนกรีตนั้นไปแล้วช่วงเวลาหนึ่ง และความเสียหายนี้อาจเกิดมาจากสาเหตุภายในหรือภายนอกเนื้อคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 สาเหตุ คือ

ด้านกายภาพ เช่น ความเสียหายเนื่องจากความร้อน ความเย็น การเปียกและแห้งสลับกัน น้ำหนักบรรทุกมากเกิน ความล้า อุบัติเหตุ

ด้านเคมี เช่น การซึมผ่านของสารเคมีเข้ามากัดกร่อนคอนกรีต และสนิมเหล็ก การกระทำของแบคทีเรีย

ด้านกล เช่น การเสียดสีจนเกิดความเสียหาย การกัดกร่อนโดยแรงลม

ขอบเขตของความเสียหายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเฉพาะที่มาเกี่ยวข้องอันได้แก่ คุณภาพของคอนกรีต ความหนาแน่นของคอนกรีต และความรุนแรงของสภาพแวดล้อม เป็นต้น

2.5.5 การลดความเสียหาย

ความเสียหายของคอนกรีตในโครงสร้างต่าง ๆ สามารถลดได้โดยพิจารณาสภาพแวดล้อม สภาพการใช้งานของโครงสร้างนั้นอย่างละเอียดก่อนการออกแบบ จากนั้นควรเลือกออกแบบและใช้ข้อกำหนดของคอนกรีตที่เหมาะสมในขั้นตอนการออกแบบ ส่วนในขั้นตอนการก่อสร้างจำเป็นต้องมีการควบคุมเป็นอย่างดี ทั้งขั้นตอนการผสม การเขย่า การแต่งผิว และการบ่ม รวมทั้งการบำรุงรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

การประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยการทำให้แข็งตัว [Sollars และ Perry , 1989] ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของการบำบัด ได้แก่ ปัจจัยต่าง ๆ เช่น การปรับปรุงให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่งคง การลดพื้นที่ผิว การจำกัดและการละลายของสารที่เป็นอันตราย เมื่อสัมผัสกับสารชะละลาย ในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นประเทศในสหราชอาณาจักร (ประเทศอังกฤษ) ยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานเป็นทางการสำหรับคุณภาพของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยวิธีการข้างต้น แต่ได้มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอาทิ หน่วยงานที่เกี่ยวกับการกำจัดน้ำเสีย (Waste Disposal Authority) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการปฏิบัติงานในการบำบัดของเสีย โดยการทดสอบค่า Compressive Strength, Permeability และ Leachability แสดงดังตารางที่ 2.12 ซึ่งกล่าวถึงรายละเอียดของสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการ Sealosafe จากโรงบำบัดของเสียที่เมือง West Thurrock

ตารางที่ 2.12 : *สมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธี* Sealosafe [Sollars และ Parry, 1989]

TABLE IV. SPECIMEN SOLIDIFIED WASTE PERFORMANCE CHARACTERISTICS REQUIRED BY A WASTE DISPOSAL AUTHORITY*

Characteristic	Requirement	Comparative values
Permeability (28 day)	$\leq 1 \times 10^{-7}$ m/s	Sand: 1×10^{-4}–5×10^{-5} m/s Silt: 1×10^{-6}–1×10^{-7} m/s Concrete: 1×10^{-8} m/s
Compressive strength (28 day)	≤ 0.34 MN/m^2	Concrete: 30 MN/m^2 Mortar: 20 MN/m^2 Grouts: 0.5–4 MN/m^2
Leachate Quality**	pH 8–11	n.a.
	COD < 280 g/m^3	"
	Total CN < 1 g/m^3	"
	Total Sulphide < 5 g/m^3	"
	Total Phenol < 5 g/m^3	"
	NH_3 < 40 g/m^3	"
	Toxic heavy metals:	
	Zn < 10 g/m^3, Hg < 0.5 g/m^3;	"
	Others (inc. Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Ba, Co, Mb, Sn, As, Se, Sb): < 5 g/m^3 total	"
	Pesticides < 0.1 g/m^3	"
	Supernatants: none after 24 h	—

n.a. = not applicable

**: Conditions: 50 g solidified waste (28 day cure), ground to fine powder, stirred 1 h with 500 ml distilled water (20°C), filtered through Whatman No. 2 filter paper

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2531) ได้ออกประกาศกรมโรงงานฯ ฉบับที่ 1 เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์ กำจัด ฝัง ทิ้ง เคลื่อนย้าย และขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสรุปเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วก่อนนำไปทิ้งหรือฝัง แสดงดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ **2.13** : วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิกูลประเภทต่าง ๆ [กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531]

ประเภทสิ่งปฏิกูล	วิธีการทำลายฤทธิ์
1. กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากตะกอนผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification) โดยผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ หรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (Additives) ผสมลงไปด้วย
2. กากจากการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากที่อาจต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อนเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ทั่วถึง มาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification) โดยการผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ หรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (Additive) ผสมลงไปด้วย
3. กากตะกอน หรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และ แมงกานีส เป็นต้น	ใช้สารละลายด่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผสมกับกากตะกอนให้ทั่ว จนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่า pH ของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอน หรือฝุ่นที่ปนเปื้อนด้วยแคดเมียม (Cd) จะต้องทำให้เป็นก้อนต่อด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์
4. กากตะกอน หรือวัสดุไม่ใช้แล้วที่มียาฆ่าแมลง ยากำจัดศัตรูพืช หรือยากำจัดเชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายด่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปริมาณที่สามารถจะทำลายพิษของตัวยาแต่ละชนิดให้หมดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (Solidification) จะต้องมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

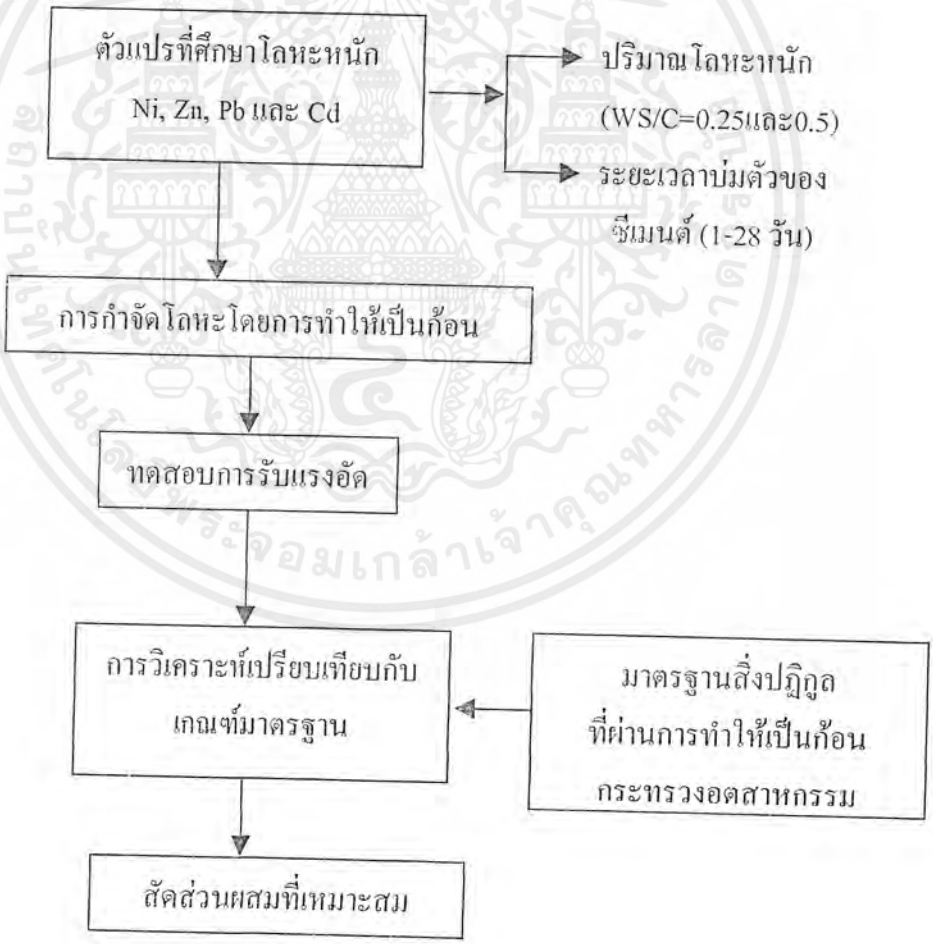
- น้ำซึมผ่านได้ในอัตราต่ำกว่า 1×10^{-6} ซม./วินาที
- รับแรงอัด (Compressive Strength) ได้ไม่น้อยกว่า 14 กก./ตร.ซม.
- มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
- มีลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการทดลองตลอดจนตัวแปรที่ศึกษาแสดงไว้ในภาพที่ 3.1 โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ชุดทดลอง



ภาพที่ 3.13 : ตัวแปรที่ศึกษา และขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วัสดุ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเพชร แสดงดังภาพที่ 3.2
2. ทราย ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช แสดงดังภาพที่ 3.3
3. น้ำ ใช้น้ำประปา

ภาพที่ 3.2 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.3 : ทราย ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช

3.3 สารเคมี

1. สารมาตรฐาน $Ni(NO_3)_2$ $Zn(NO_3)_2$ $Pb(NO_3)_2$ และ $Cd(NO_3)_2$
2. น้ำกลั่น

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์

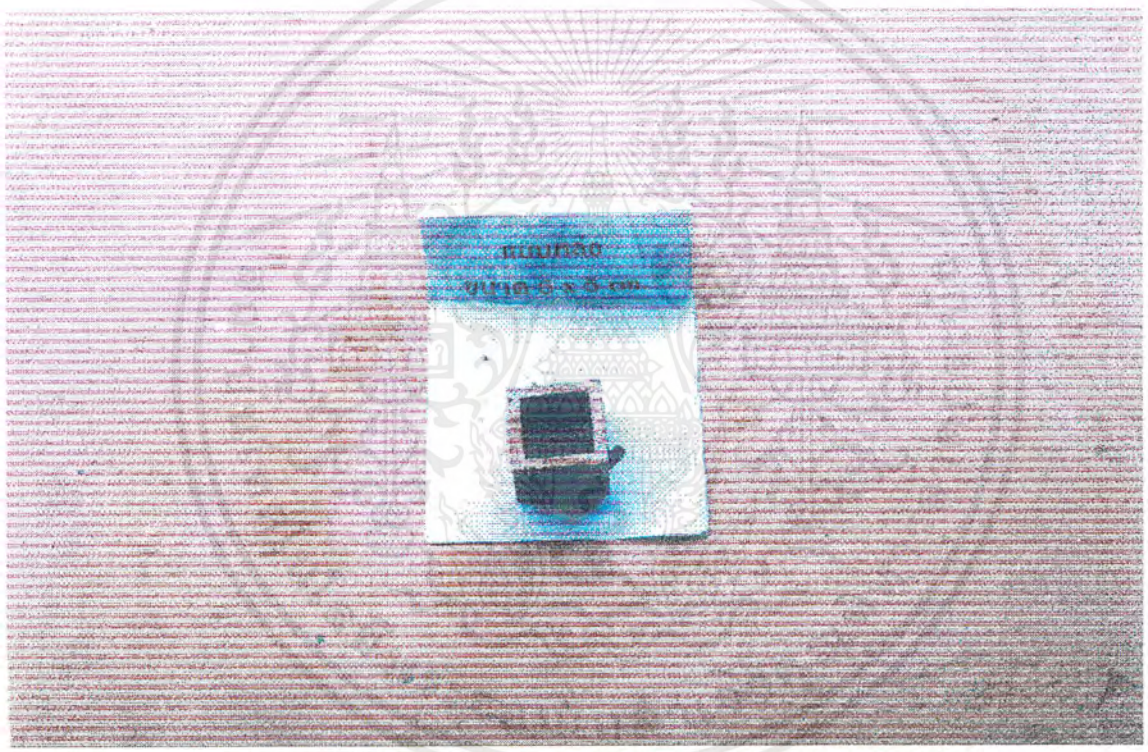
1. เครื่องชั่ง แสดงดังภาพที่ 3.4
2. กระบอกตวงขนาด 500 ml อ่านละเอียด 10 ml
3. แบบหล่อขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม. แสดงดังภาพที่ 3.5
4. เครื่องผสมปูนซีเมนต์ (Mixer) แสดงดังภาพที่ 3.6
5. เหล็กกระทุ้ง (Temper) ขนาดหน้าตัด ½ x 1 นิ้ว มีความยาว 5-6 นิ้ว ปลายตัดเรียบ และหน้าตัดตั้งฉากกับแกน ทำจากวัสดุที่ไม่ดูดซึมน้ำ แสดงดังภาพที่ 3.7
6. เกรียงขนาดหน้ากว้างของใบ 4-6 นิ้ว แสดงดังภาพที่ 3.8
7. เครื่องทดสอบแรงอัด (Testing Machine) แสดงดังภาพที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ตะแกรงร่อนขนาด 20-10 แสดงดังภาพที่ 3.10

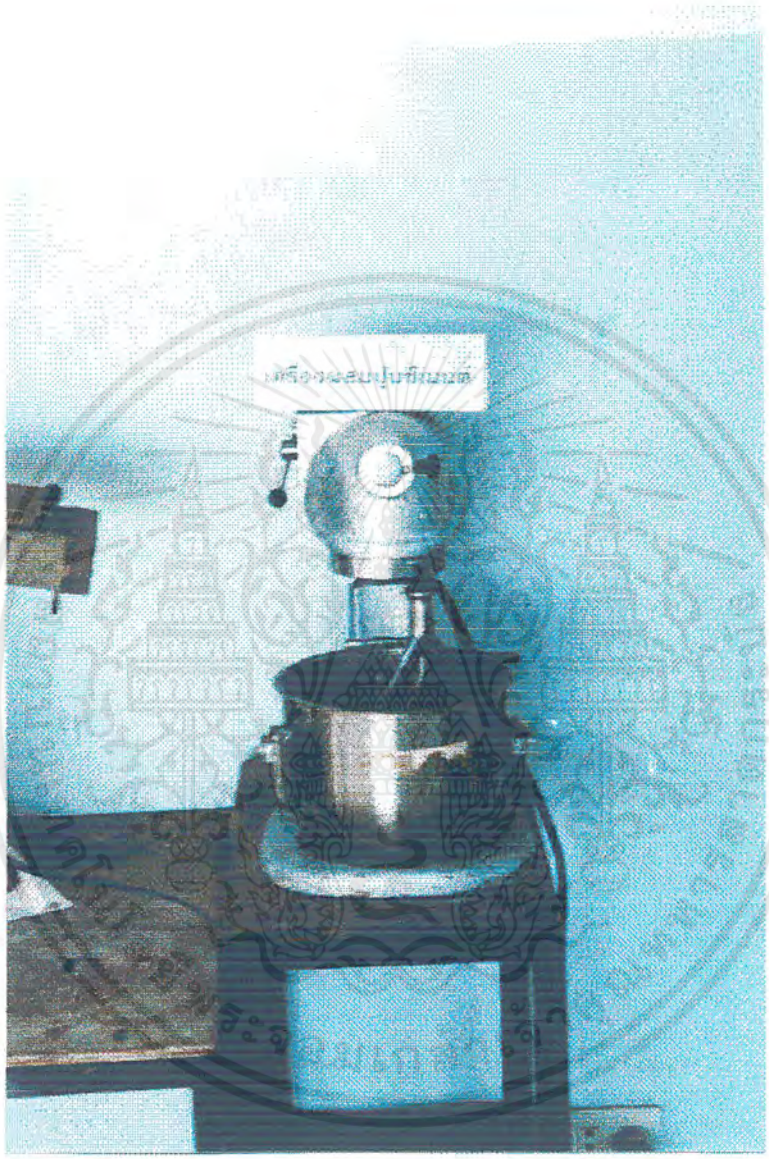
ภาพที่ 3.4 : เครื่องชั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



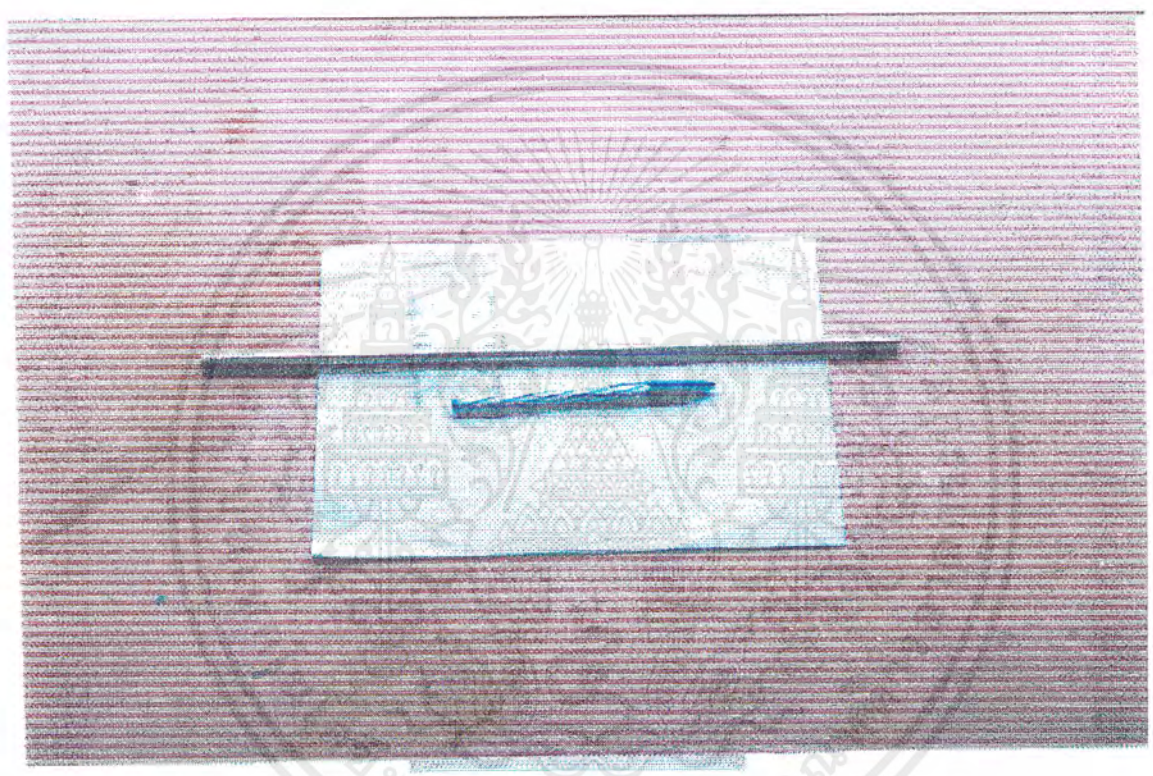
ภาพที่ 3.5 : แบบหล่อขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



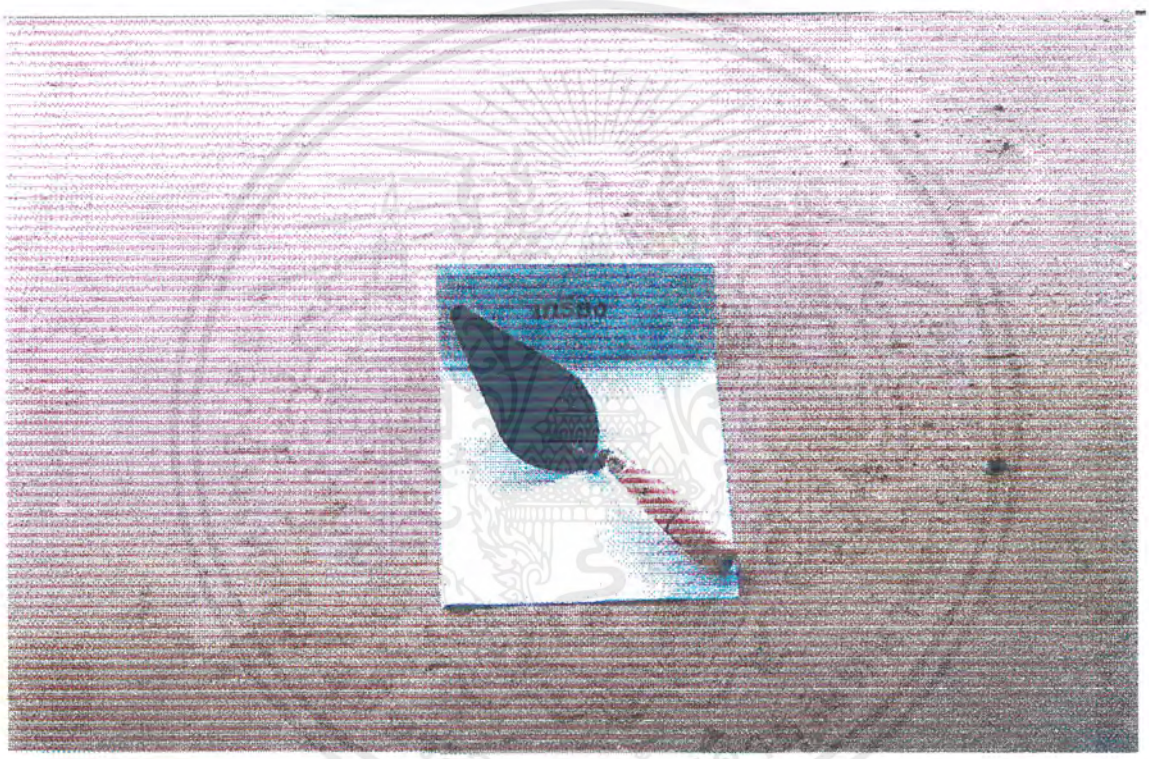
ภาพที่ 3.6 : เครื่องผสมปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



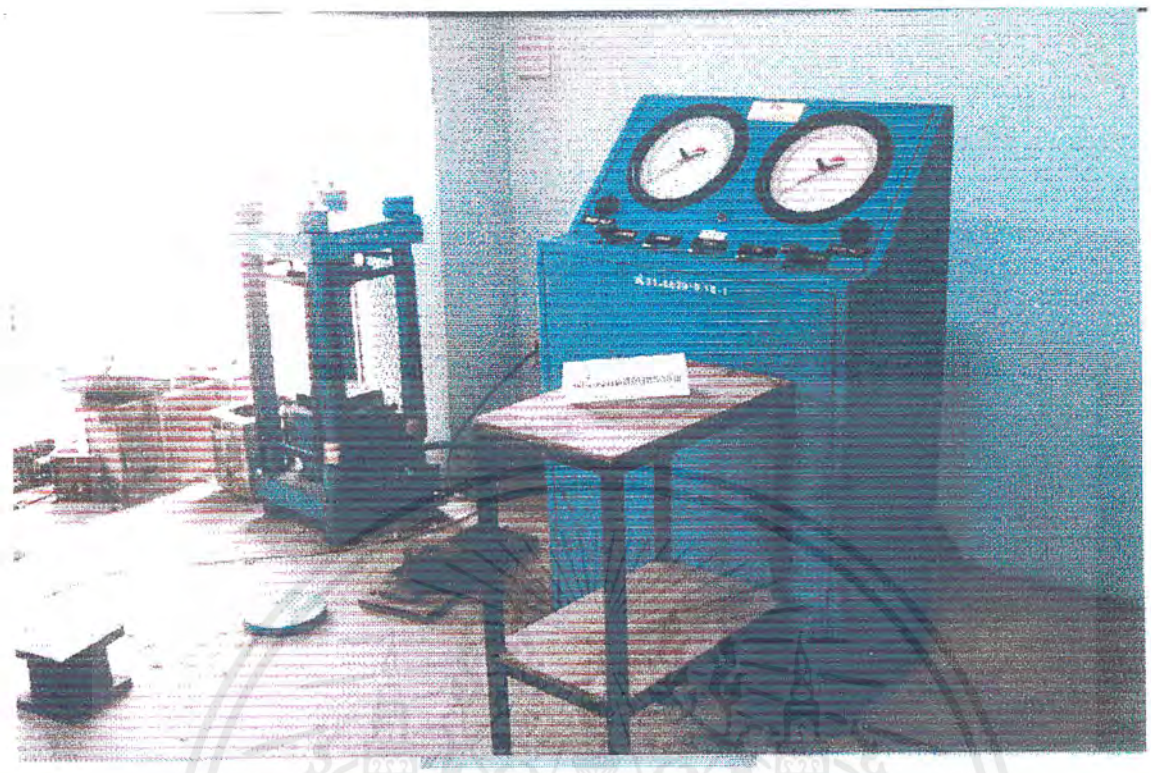
ภาพที่ 3.7 : เหล็กกระทุ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

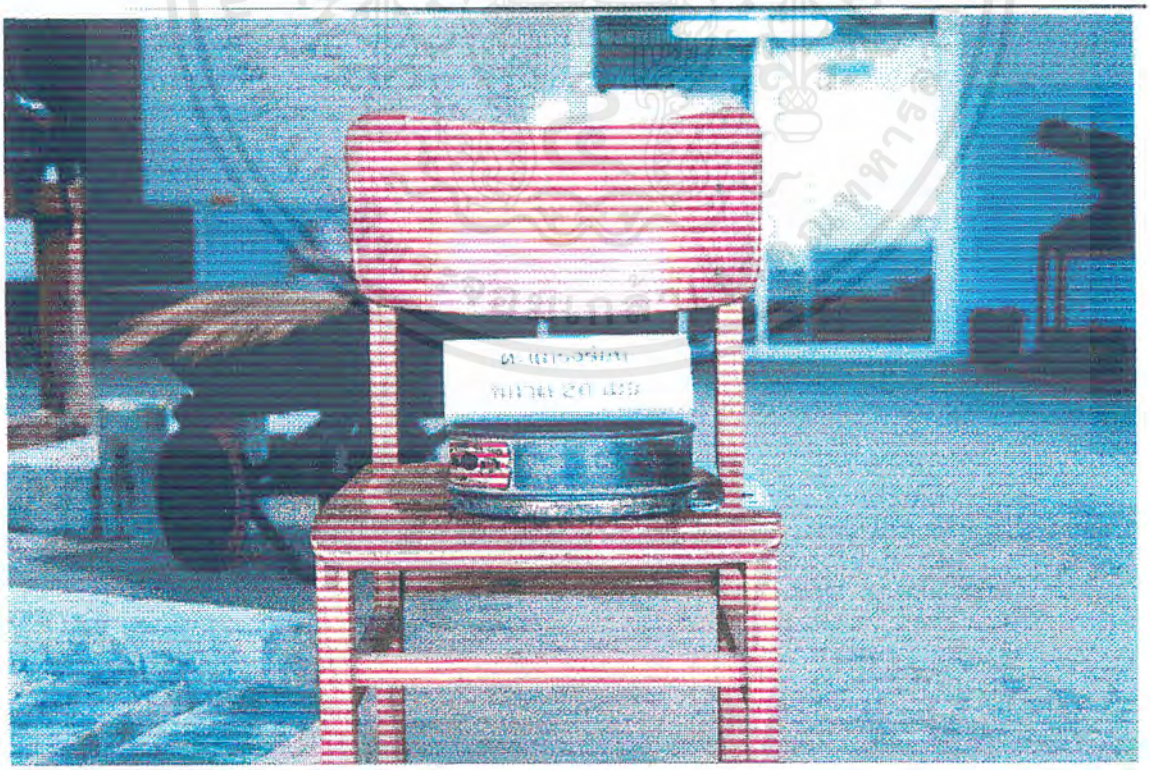


ภาพที่ 3.8 : เกรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.9 : เครื่องทดสอบแรงอัด



ภาพที่ 3.9 : ตะแกรงร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การเตรียมก้อนซีเมนต์

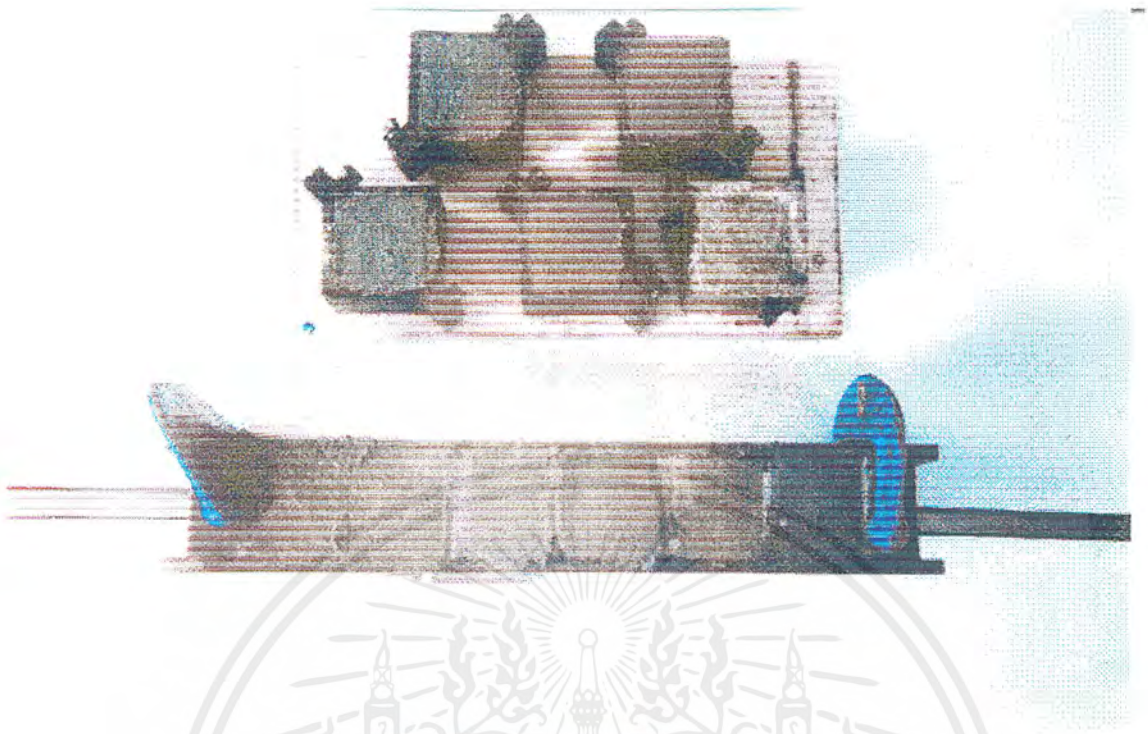
1. ชั่งวัสดุที่ใช้ในการหล่อซีเมนต์ ตามมาตราฐานของ ASTM C 109-86 ในแบบหล่อขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม. ใช้สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของ ปูนซีเมนต์ : น้ำ : ทราย เท่ากับ 100 : 50 : 200 และใช้สัดส่วนผสมโลหะหนักต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.00, 0.25 และ 0.5 ตามลำดับ ในการผสมซีเมนต์ ใช้จำนวนตัวอย่างครั้งละ 3 ตัวอย่าง

2. ผสมปูนซีเมนต์ และส่วนผสมอื่น ๆ ในเครื่องผสม (Mixer) จนเข้ากันดี

3. เทซีเมนต์ที่ผสมแล้วลงในแบบหล่อมอร์ตาร์ภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที และ 30 วินาที หลังจากผสมเสร็จ การหล่อจะแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกจะหนาประมาณ 1 นิ้ว หรือ 25 มม. แล้วใช้เหล็กกระทุ้ง (Tamper) กระทุ้งชั้นละ 16 ครั้ง โดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลัง ให้ใช้แรงกระทุ้งพอประมาณ และเท่ากันโดยตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมมอร์ตาร์ครั้งที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อย และใช้มือป้องขณะกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก

4. ใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ส่วนที่เกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย ได้ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 3.11 เก็บตัวอย่างพร้อมแบบหล่อไว้ในที่ชื้นทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.11 : ตัวอย่างที่หล่อเรียบร้อย

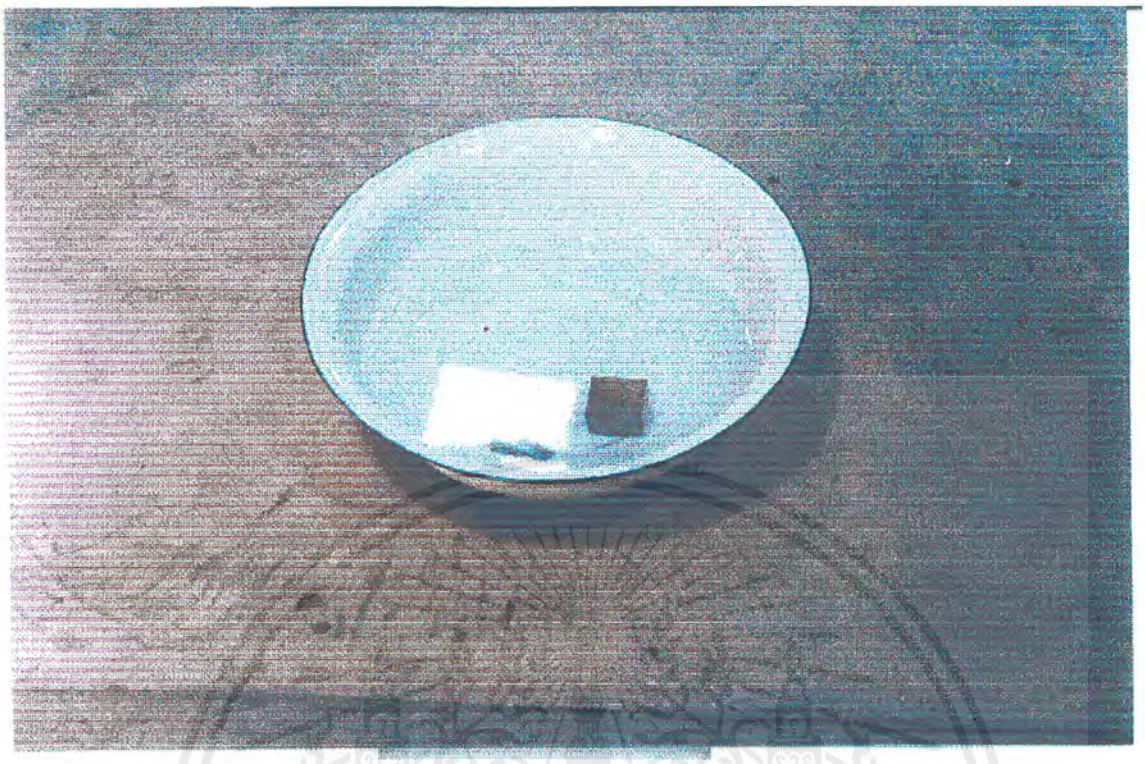
5. ถอดแบบหลังจาก 24 ชม. แสดงดังภาพที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.12 : ลูกปูนที่ถอดจากแบบ

6. บ่มตัวอย่างต่อจนครบ 7 วัน โดยใช้ผ้ากระสอบชุ่มน้ำคลุมทับ หรือแช่ไว้ในน้ำ แสดงดังภาพที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



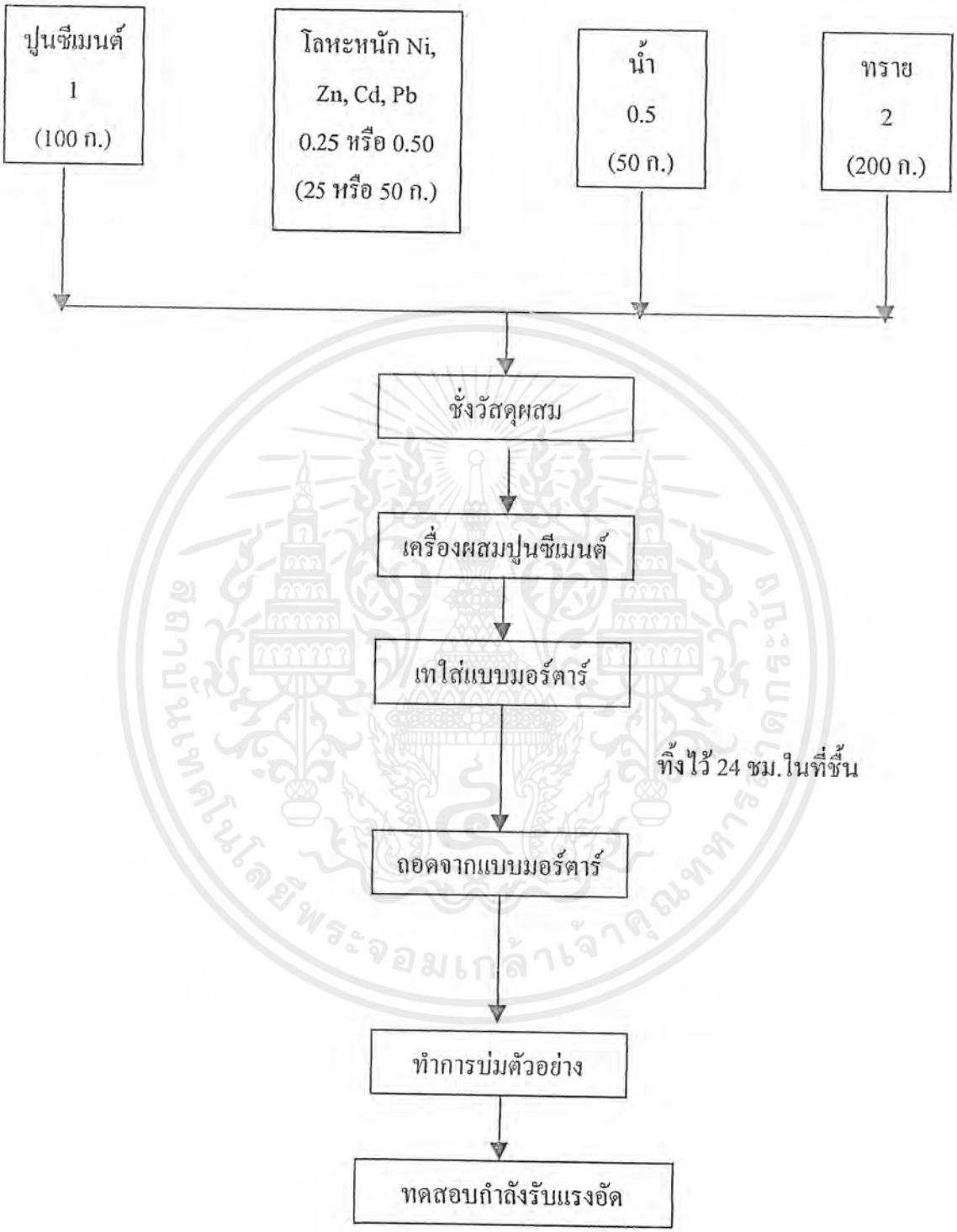
ภาพที่ 3.13 : การบ่มตัวอย่าง

7. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนชนิดของโลหะหนักเป็นโลหะหนักนิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ตามลำดับ

สรุปเป็นแผนภาพแสดงสัดส่วนของวัสดุซีเมนต์ และขั้นตอนการหล่อซีเมนต์ ดังภาพที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนผสมต่อวัสดุประสาน



ภาพที่ 3.14 : สัดส่วนของวัสดุซีเมนต์ และขั้นตอนการเตรียมก้อนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ทดสอบกำลังรับแรงอัด

นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.5.1 ไปทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยเครื่อง Test Machine ด้วยวิธีการดังนี้

1. นำก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณความหนาแน่นโดยหารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่าง

2. วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะให้แรงกดโดยใช้ด้านที่สัมผัสกับแบบหล่อ

3. เช็ดผิวหน้าทั้งสองด้าน

4. ใช้แรงกดทับแท่งตัวอย่างในเวลา 20-80 วินาที โดยผิวหน้าของเครื่องมือทั้งสองด้านที่สัมผัสกับก้อนตัวอย่างจะต้องเรียบ และตัวอย่างจะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง

5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนชนิดของโลหะหนักเป็นโลหะหนักนิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ตามลำดับ

3.5.3 ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มตัวต่อกำลังรับแรงอัด

1. จากผลการทดลองในข้อที่ 3.5.2 เลือกสัดส่วนผสมโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม และเปลี่ยนตัวแปรในการทดสอบเป็นระยะเวลาบ่มตัวในการหล่อซีเมนต์ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

2. ทดสอบกำลังรับแรงอัด และคำนวณความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์

3. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-2 โดยเปลี่ยนชนิดของโลหะเป็นโลหะหนักนิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 การศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์โลหะหนักโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อน

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์ของโลหะหนักโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งศึกษาผลของสัดส่วนโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดโดยแปรค่าสัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสานระหว่าง 0.00-0.50 ใช้ระยะเวลาบ่มตัว 7 วัน จากนั้นนำโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดที่เป็นก้อนแล้วไปทดสอบสมบัติกำลังรับแรงอัด และเปรียบเทียบผลการทดลองกับเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน เลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการทดลองต่อไป

4.1.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

1. กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโลหะหนักไนเตรทที่ทำให้เป็นก้อน เมื่อมีโลหะหนักไนเตรทผสมในสัดส่วน 0.00, 0.25 และ 0.50 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 : ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทเจือปน

ชนิดของโลหะหนัก	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		
	สัดส่วนผสมของโลหะหนักต่อวัสดุประสาน		
	0.00	0.25	0.50
นิกเกิลไนเตรท	215.34	157.63	87.34
สังกะสีไนเตรท	215.34	40.00	17.22
ตะกั่วไนเตรท	215.34	143.13	68.24
แคดเมียมไนเตรท	215.34	123.42	32.51

หมายเหตุ : เกณฑ์มาตราฐานของสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าสูงกว่า 14 กก./ตร.ซม.

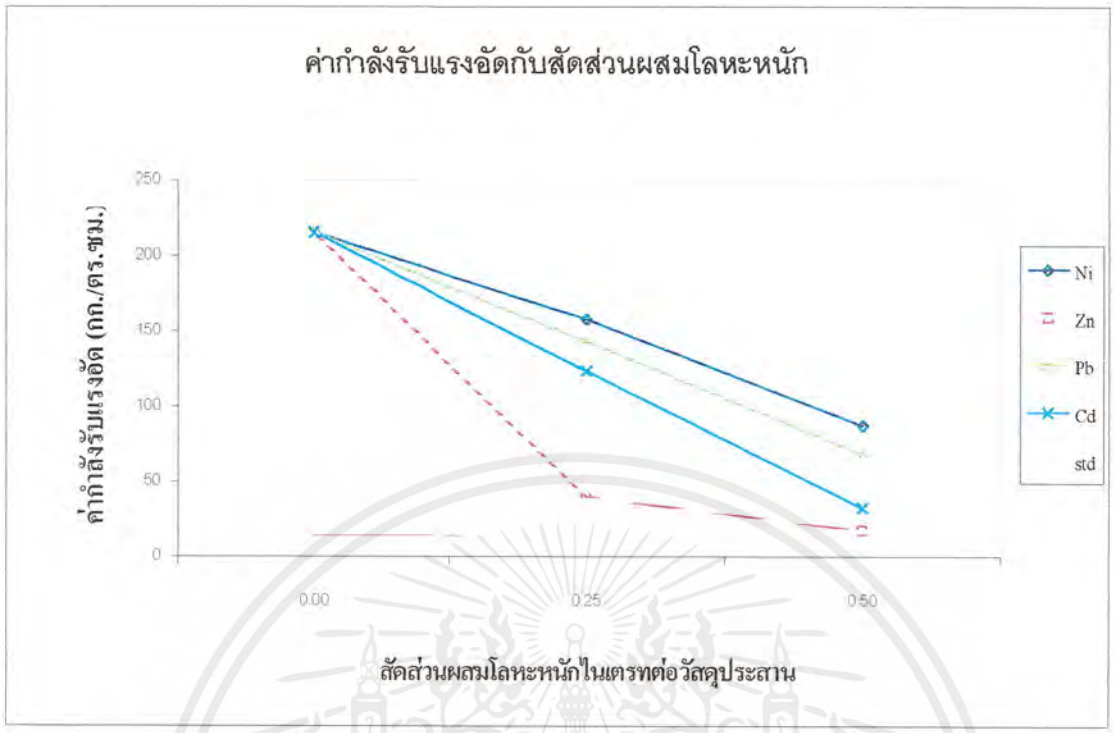
จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทเจือปน พบว่า ซีเมนต์แท่งที่ไม่มีโลหะหนักไนเตรทเจือปนมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ 215.34 กก./ตร.ซม.

สำหรับที่สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25 ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรท พบว่า ซีเมนต์แท่งที่มีนิกเกิลไนเตรทมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเป็น 157.63 กก./ตร.ซม. ส่วนตะกั่วไนเตรท แคดเมียมไนเตรท และสังกะสีไนเตรทมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามลำดับ คือ 143.13, 123.42 และ 40.00 กก./ตร.ซม.

สำหรับที่สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า แนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งลดลงเช่นเดียวกับการผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทชนิดเดียวกัน พบว่า ที่สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.50 ทุกชนิดมีค่าต่ำกว่าที่สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25

แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งที่สัดส่วนผสมทั้งสองกับเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ยังมีค่าสูงกว่า 14 กก./ตร.ซม. แสดงดังภาพที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงอัด กับสัดส่วนผสมของโลหะหนักในเตรทต่อวัสดุประสาน

2. ความหนาแน่น

ผลการคำนวณความหนาแน่นของโลหะหนักในเตรทที่ทำให้เป็นก้อน เมื่อมีโลหะหนักในเตรทผสมในสัดส่วน 0.00, 0.25 และ 0.50 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 : ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทเจือปน

ชนิดของโลหะหนัก	ความหนาแน่น (ตัน/ตร.ม.)		
	สัดส่วนผสมของโลหะหนักต่อวัสดุประสาน		
	0.00	0.25	0.50
นิกเกิลไนเตรท	1.77	1.82	2.02
สังกะสีไนเตรท	1.77	1.56	2.03
ตะกั่วไนเตรท	1.77	2.13	2.19
แคดเมียมไนเตรท	1.77	1.90	2.12

หมายเหตุ : เกณฑ์มาตราฐานของสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าสูงกว่า 1.04 ตัน/ตร.ม.

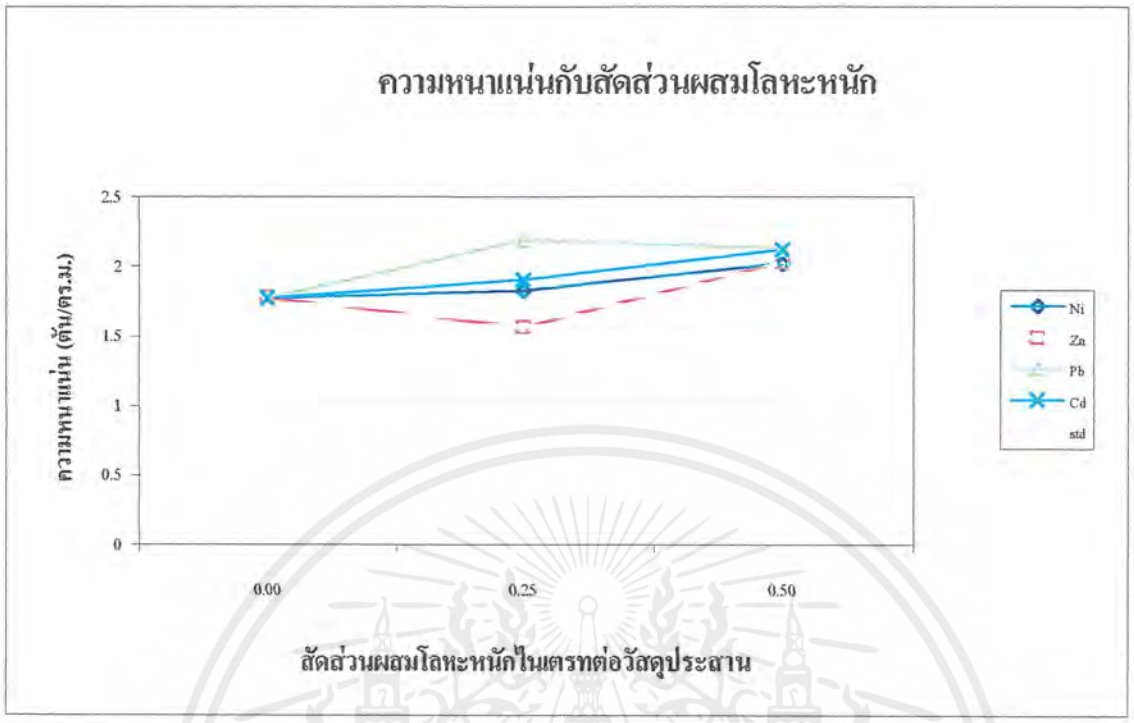
จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทเจือปน พบว่า ซีเมนต์แท่งที่ไม่มีโลหะหนักไนเตรทเจือปนมีค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้ คือ 1.77 ตัน/ตร.ม.

สำหรับที่สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25 ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรท พบว่า ซีเมนต์แท่งที่มีตะกั่วไนเตรทมีค่าความหนาแน่นสูงสุดเป็น 2.13 ตัน/ตร.ม. ส่วนแคดเมียมไนเตรท นิกเกิลไนเตรท และสังกะสีไนเตรท มีค่าความหนาแน่นลดลงตามลำดับ คือ 1.90, 1.82 และ 1.56 ตัน/ตร.ม.

แต่ที่สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.50 ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรท พบว่า ซีเมนต์แท่งที่มีตะกั่วไนเตรทมีค่าความหนาแน่นสูงสุดเป็น 2.19 ตัน/ตร.ม. ส่วนแคดเมียมไนเตรท สังกะสีไนเตรท และนิกเกิลไนเตรท มีค่าความหนาแน่นลดลงตามลำดับ คือ 2.12, 2.03 และ 2.02 ตัน/ตร.ม. เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรทชนิดเดียวกันทั้งสองสัดส่วน พบว่า ที่สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าซีเมนต์แท่งที่มีสัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25

และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของซีเมนต์แท่งที่สัดส่วนผสมทั้งสองกับเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน พบว่า ทุกสัดส่วนผสมมีค่ามีค่าสูงกว่า 1.04 ตัน/ตร.ม. แสดงดังภาพที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่น กับสัดส่วนผสมของโลหะหนักในเตรทต่อวัสดุประสาน

4.1.2. การพิจารณาเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมในขั้นต้น

การพิจารณาเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมในขั้นต้นจะพิจารณาเกณฑ์มาตราฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนซึ่งกำหนดสมบัติทางกายภาพให้มีกำลังรับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 14 กก./ตร.ซม. และมีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตัน/ตร.ม.

จากการพิจารณาสมบัติทางกายภาพ พบว่า สัดส่วนผสมของโลหะหนักในเตรทต่อวัสดุประสาน 0.00–0.50 สามารถผ่านเกณฑ์มาตราฐานดังกล่าว ผู้ทำการวิจัยได้พิจารณาเลือกสัดส่วนผสมของโลหะหนักในเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25 เพื่อเป็นตัวแทนในการทดลองตัวแปรต่อไป เนื่องจากเห็นว่าเป็นสัดส่วนผสมที่สามารถทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์มาตราฐาน และมีส่วนผสมของโลหะหนักในเตรทอยู่ในปริมาณที่ไม่ต่ำมากนัก ทำให้ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักในเตรทเจือปนอยู่ได้อย่างชัดเจน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดของเสียประเภทโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการได้อีกทางหนึ่งด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาสัดส่วนของโลหะหนัก และโลหะหนักผสมในซีเมนต์ที่มีผลต่อสมบัติการรับแรงอัด

1. กำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4.3 : ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโลหะหนักที่ทำให้เป็นก้อน

ชนิดของโลหะหนัก	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	
	สัดส่วนผสมของโลหะหนักต่อวัสดุประสาน	
	0.00	0.25
นิกเกิลไนเตรท	215.34	157.63
สังกะสีไนเตรท	215.34	40.00
ตะกั่วไนเตรท	215.34	143.13
แคดเมียมไนเตรท	215.34	123.42
โลหะหนักผสม	215.34	59.00

หมายเหตุ : เกณฑ์มาตราฐานของสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าสูงกว่า 14 กก./ตร.ซม.

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโลหะหนักที่ทำให้เป็นก้อน พบว่า ซีเมนต์แท่งที่ไม่มีโลหะหนักไนเตรทเจือปนมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ 215.34 กก./ตร.ซม.

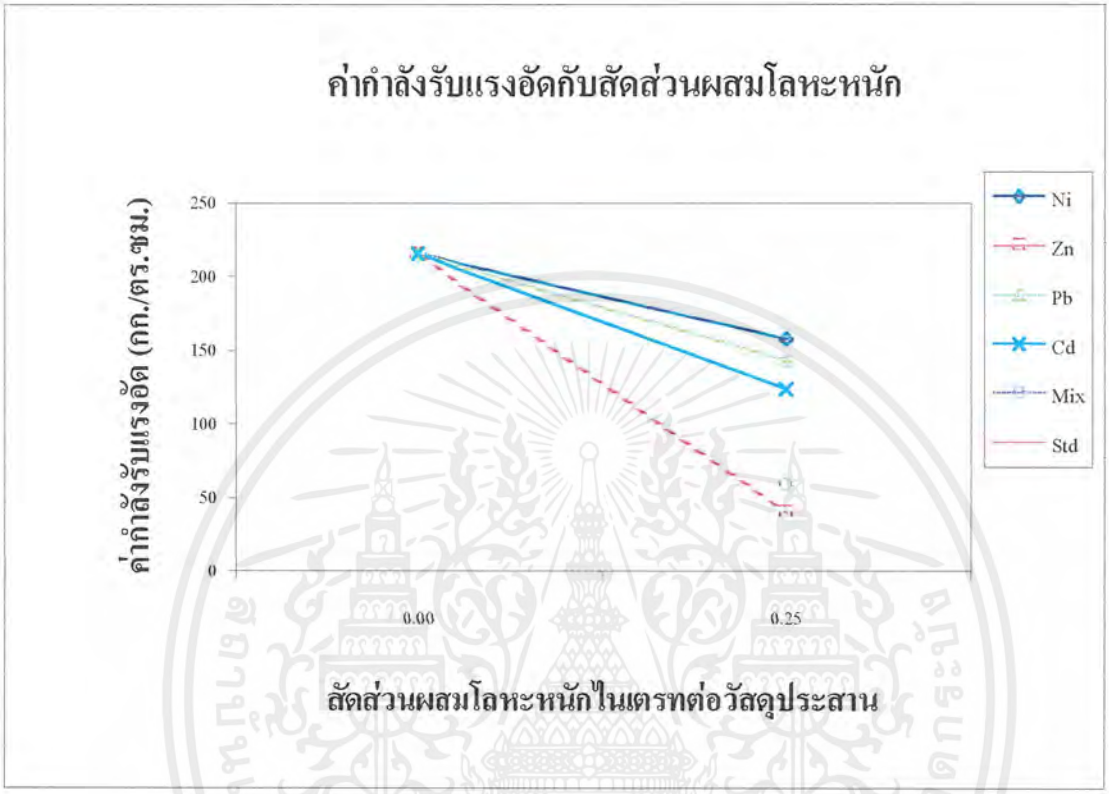
สำหรับก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทเพียงอย่างเดียวเจือปนอยู่ พบว่า แนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักนิกเกิลไนเตรท ตะกั่วไนเตรท แคดเมียมไนเตรท และสังกะสีไนเตรท เรียงลำดับดังนี้ 157.63, 143.13, 123.42 และ 40.00 กก./ตร.ซม.

สำหรับก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งมีค่า เท่ากับ 59.00 กก./ตร.ซม. ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว แต่ก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ก็ยังให้ค่าสูงกว่าก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักสังกะสีไนเตรทเพียงอย่างเดียว

เมื่อทำการเปรียบเทียบซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักผสมเจือปนอยู่ กับเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แท่งที่มีโลหะหนักในเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักในเตรทผสมเจือปนอยู่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 14 กก./ตร.ซม. แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 : ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด
กับสัดส่วนผสมของโลหะหนักในเตรทต่อวัสดุประสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความหนาแน่น

ตารางที่ 4.4 : ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของโลหะหนักที่ทำให้เป็นก้อน

ชนิดของโลหะหนัก	ความหนาแน่น (ตัน/ตร.ม.)	
	สัดส่วนผสมของโลหะหนักต่อวัสดุประสาน	
	0.00	0.25
นิกเกิลไนเตรท	1.77	1.82
สังกะสีไนเตรท	1.77	1.56
ตะกั่วไนเตรท	1.77	2.13
แคดเมียมไนเตรท	1.77	1.90
โลหะหนักผสม	1.77	2.12

หมายเหตุ : เกณฑ์มาตราฐานของสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าสูงกว่า 1.04 ตัน/ตร.ม.

จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณความหนาแน่นของโลหะหนักที่ทำให้เป็นก้อน พบว่า ซีเมนต์แท่งที่ไม่มีโลหะหนักไนเตรทเจือปนมีค่าความหนาแน่น คือ 1.77 ตัน/ตร.ม.

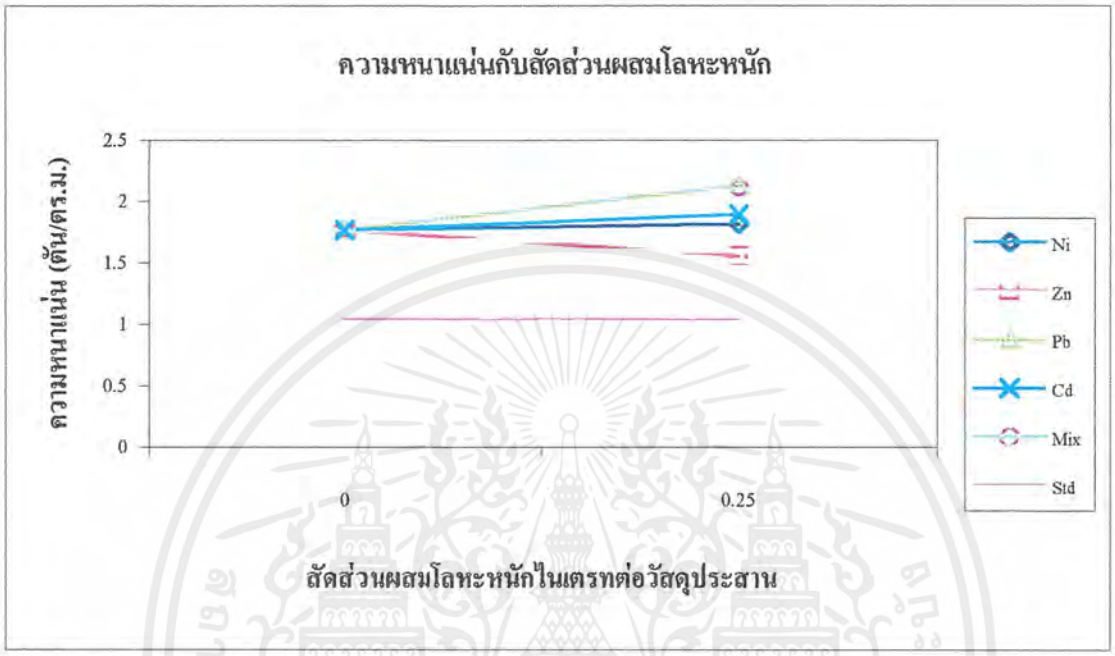
สำหรับก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทเพียงอย่างเดียวเจือปนอยู่ พบว่า แนวโน้มค่าความหนาแน่นของซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักตะกั่วไนเตรท แคดเมียมไนเตรท นิกเกิลไนเตรท และสังกะสีไนเตรท เรียงลำดับดังนี้ 2.13, 1.90, 1.82 และ 1.56 ตัน/ตร.ม.

สำหรับก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ พบว่า ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์แท่งมีค่า เท่ากับ 2.12 ตัน/ตร.ม. ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว แต่ก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ก็ยังให้ค่าต่ำกว่าก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักตะกั่วไนเตรทเพียงอย่างเดียว

เมื่อทำการเปรียบเทียบซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักผสมเจือปนอยู่ กับเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักผสมเจือปนอยู่ให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่า 1.04 ตัน/ตร.ม. แสดงดังภาพที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะหนักแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักผสมเจือปนอยู่ให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่า 1.04 ตัน/ตร.ม. แสดงดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่น กับสัดส่วนผสมโลหะหนักในเตรทต่อวัสดุประสาน

4.3 การศึกษาระยะเวลาบ่มตัวของโลหะหนัก และโลหะหนักผสมในซีเมนต์ต่อสมบัติกำลังรับแรงอัด

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลาบ่มตัวต่อกระบวนการทำให้เป็นก้อน โดยใช้สัดส่วนผสมของโลหะหนักในเตรทต่อวัสดุประสาน 0.25 ซึ่งวัสดุประสานที่ใช้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำการทดลองแปรค่าระยะเวลาบ่มตัวที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติทางกายภาพสรุปผลได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัด

ค่ากำลังรับแรงอัดของโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ที่ระยะเวลาบ่มตัวที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 : ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ

ชนิดของโลหะหนัก	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)				
	ระยะเวลาบ่มตัว (วัน)				
	1	3	7	14	28
นิกเกิลไนเตรท	103.08	125.52	157.63	330.64	446.74
สังกะสีไนเตรท	28.62	38.24	40.00	40.37	46.14
ตะกั่วไนเตรท	52.10	100.06	143.14	244.02	252.63
แคดเมียมไนเตรท	85.30	100.00	123.42	189.73	199.77
โลหะหนักผสม	39.22	48.04	59.00	250.95	316.41

หมายเหตุ : เกณฑ์มาตราฐานของสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าสูงกว่า 14 กก./ตร.ซม.

จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ พบว่า ก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทเพียงอย่างเดียวเจือปนอยู่ ให้แนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งเพิ่มขึ้นจากที่ระยะเวลาบ่มตัวที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักนิกเกิลไนเตรทเพียงอย่างเดียวจะมีค่าสู.สุดอยู่ในช่วง 103.08-446.74 กก./ตร.ซม. ก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักตะกั่วไนเตรทจะมีค่า 52.10-252.63 กก./ตร.ซม. ก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักแคดเมียมไนเตรทจะมีค่า 85.30-199.77 กก./ตร.ซม. ส่วนก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักสังกะสีไนเตรทจะมีค่าต่ำสุด คือ อยู่ในช่วง 28.62-46.14 กก./ตร.ซม.

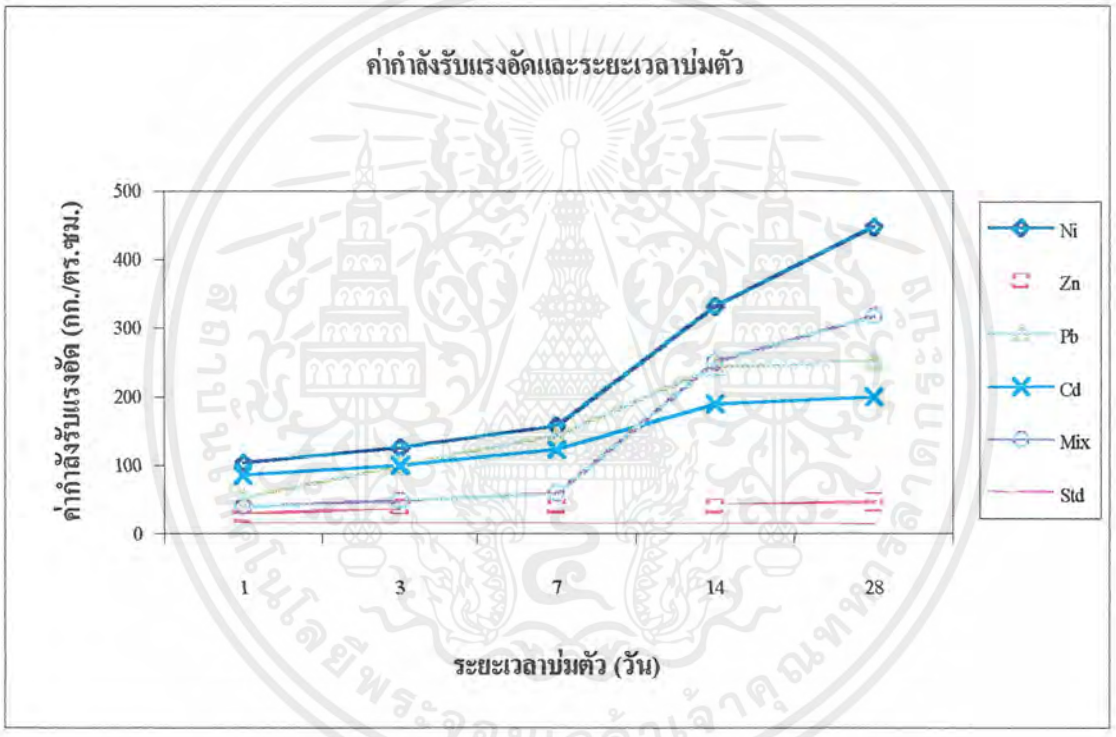
สำหรับก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์แท่งมีค่า39.22, 48.04, 59.00, 250.95 และ 316.41 กก./ตร.ซม. เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มตัวที่เพิ่มขึ้นจาก 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว กับแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ พบว่า ซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักสังกะสีไนเตรทเจือปนอยู่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ในทุกระยะเวลาบ่มตัว สำหรับซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักตะกั่วไนเตรท และแคดเมียมไนเตรทเจือปนอยู่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ที่ระยะเวลาบ่มตัว 14 และ 28 วัน เท่านั้น แต่ซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักนิกเกิลไนเตรทเจือปนอยู่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ในทุกระยะเวลาบ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ที่ระยะเวลาบ่มตัว 14 และ 28 วัน เท่านั้น แต่ซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักนิกเกิลไนเตรทเจือปนอยู่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ในทุกระยะเวลาบ่มตัว

เมื่อทำการเปรียบเทียบซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่กับเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 14 กก./ตร.ซม. แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 : ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่มตัว

2. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นมีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มตัวจาก 1, 3, 7 ,14 และ 28 วัน ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 : ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มตัวต่าง ๆ

ชนิดของโลหะหนัก	ความหนาแน่น (ตัน/ตร.ม.) ระยะเวลาบ่มตัว (วัน)				
	1	3	7	14	28
นิกเกิลไนเตรท	1.18	1.98	1.82	2.10	2.20
สังกะสีไนเตรท	1.04	1.08	1.56	2.05	2.10
ตะกั่วไนเตรท	1.02	1.15	2.19	2.25	2.36
แคดเมียมไนเตรท	1.08	1.17	1.90	2.15	2.27
โลหะหนักผสม	1.10	1.71	2.12	2.15	2.27

หมายเหตุ : เกณฑ์มาตราฐานของสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าสูงกว่า 1.04 ตัน/ตร.ม.

จากข้อมูลในตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ พบว่า ก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทเพียงอย่างเดียวเจือปนอยู่ ให้แนวโน้มค่าความหนาแน่นของซีเมนต์แท่งเพิ่มขึ้นจากที่ระยะเวลาบ่มตัวที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักนิกเกิลไนเตรทเพียงอย่างเดียวจะมีค่า 1.18 และ 2.20 ตัน/ตร.ม. ก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักสังกะสีไนเตรทเพียงอย่างเดียวจะมีค่า 1.04 และ 2.10 ตัน/ตร.ม. ก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักตะกั่วไนเตรทเพียงอย่างเดียวจะมีค่า 1.02 และ 2.36 ตัน/ตร.ม. ส่วนก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักแคดเมียมไนเตรทเพียงอย่างเดียวจะมีค่า 1.08 และ 2.27 ตัน/ตร.ม. ที่ระยะเวลาบ่มตัว 1 และ 28 วัน ตามลำดับ

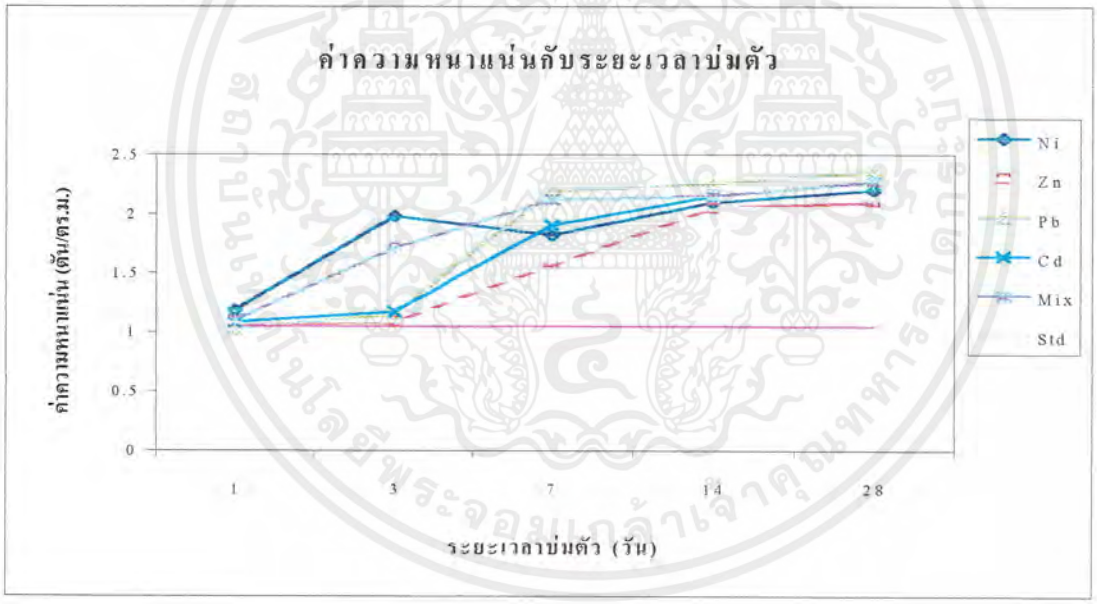
สำหรับก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ พบว่า ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์แท่งมีค่า 1.10 , 1.71 , 2.12 , 2.15 และ 2.27 ตัน/ตร.ม. เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มตัวที่เพิ่มขึ้นจาก 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว กับแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ พบว่า ซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักสังกะสีไนเตรทเจือปนอยู่ให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ในทุกระยะเวลาบ่มตัว สำหรับซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักตะกั่วไนเตรทเจือปนอยู่ให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ที่ระยะเวลาบ่มตัว 3 และ 7 วัน เท่านั้น สำหรับซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักแคดเมียมไนเตรทเจือปนอยู่ให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ที่ระยะเวลาบ่มตัว 1, 3, 7 และ 14 วัน เท่านั้น โดยที่ระยะเวลาบ่มตัว 28 วันให้ค่าความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ที่ระยะเวลาบ่มตัว 3 และ 7 วัน เท่านั้น สำหรับซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักแคดเมียมไนเตรทเจือปนอยู่ให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ที่ระยะเวลาบ่มตัว 1, 3, 7 และ 14 วัน เท่านั้น โดยที่ระยะเวลาบ่มตัว 28 วันให้ค่าความหนาแน่นเท่ากับซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ แต่ซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักนิกเกิลไนเตรทเจือปนอยู่ให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่าแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ที่ระยะเวลาบ่มตัว 1 และ 3 วัน เท่านั้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่กับเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าซีเมนต์แท่งที่มีโลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว และแท่งซีเมนต์ที่มีโลหะหนักไนเตรทผสมเจือปนอยู่ให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่า 1.04 ตัน/ตร.ม. แสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกับระยะเวลาบ่มตัวต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์โลหะหนักไนเตรทแต่ละชนิด และโลหะหนักไนเตรทผสม โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งได้ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ สรุปผลได้ดังนี้

1. การเพิ่มสัดส่วนผสมโลหะหนักไนเตรทลงในวัสดุประสานจะมีผลทำให้ ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง และค่าความหนาแน่น มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรทต่อวัสดุประสาน คือ 0.25

2. ระยะเวลาบ่มตัวมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัด และค่าความหนาแน่นของโลหะหนักไนเตรทที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

3. โลหะหนักไนเตรทที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยสัดส่วนผสม 0.25 ที่ระยะเวลาบ่มตัว 28 วัน ทำให้สมบัติกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น และมีค่าเกินเกณฑ์มาตราฐานเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตราฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

4. ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เมื่อคอนกรีตมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก และโลหะหนักผสมเปรียบเทียบกับผลการทดสอบนี้ โดยใช้โลหะหนักที่เป็นของเสียจากห้องปฏิบัติการโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์โลหะหนักและโลหะหนักผสมโดยเปลี่ยนวัสดุประสานเป็นชนิดอื่น

3. ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดควรมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอเพื่อให้สามารถรับแรงอัดได้เท่า ๆ กันทั่วทั้งชิ้นงาน

4. ในการปฏิบัติงานกับโลหะหนักควรคำนึงถึงอันตรายที่จะได้รับ โดยมีการป้องกันอันตรายจากพิษของโลหะหนักในขณะปฏิบัติงานด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กองมาตราฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม "รายงานผลการปฏิบัติงานของคณะอนุกรรมการการสืบค้นปัญหาอันเนื่องมาจากสารเป็นพิษ และจัดอันดับความสำคัญ ปี 2526 – 2527." สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กรุงเทพฯ 2527

กระทรวงอุตสาหกรรม "ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2531) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2521 เรื่อง หน้าที่ของผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน." กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ 2521

กรมโรงงานอุตสาหกรรม "ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์ กำจัด ฝังทิ้ง เคลื่อนย้าย และการขนส่งสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (ฉบับที่ 1) พ.ศ. 2531." กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ 2531

นฤมิต คินิมาน "การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2538

พิภพ ศุนทรสมัย "วัสดุวิศวกรรมการก่อสร้าง" สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2532

วินิต ช่อวิเชียร "คอนกรีตเทคโนโลยี" ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.

American Society for Testing and Materials. "Standard Method of Testing for Compressive Strength of Hydraulic Cement Motars (Using 2 – in or 50 –mm Cube Specimens)." C 109 – 86, Annual Book of ASTM Standard, Section 4, Vol.04.02, pp. 74–79, 1986.

American Society for Testing and Materials. "Standard Method of Testing for Compressive Strength of Hydraulic Cement Motars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)." C 349 – 82, Annual Book of ASTM Standard, Section 4, Vol.04.01, pp. 266–269, 1986.

Bishop, P.L. "Leaching of Inorganic Hazardous Constituents from Stabilized/Solidified Hazardous Wastes." Hazardous Waste and hazardous Material, Vol 5 pp. 129-143, 1988.

Chang, C.L. "Solidification of Heavy Metals Using Cement and Rice Husk ash" Master's Thesis, Engineering, Asian Instituted of Technology, 1989.

Chang, K.Y. and Bishop, P. "Metal Distribution in Solidified/Stabilized Waste Forms after Leaching." Hazardous Waste and Hazardous Materials, Vol 9 pp. 163-171, 1992.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Engineering Science Co. Ltd., Thai DCI Co. Ltd. And Systems Engineering Co. Ltd. "National Hazardous Waste Management Plan." Office of the National Environment Board, Ministry of Science, Technology and Energy, Kingdom of Thailand, 1989.

Perket, C.L. and Webster,W.C. "The Dissolution/Leaching Behavior of Mental Hydroxide/Mental Sulfide Sludges from Plating Waste Water." Hazardous Waste and Hazardous Materials, Vol 4 pp. 325-355, 1981.

Patty, F.A. "Industrial Hygiene and Toxicology." Second Revised Edition, Vol. 2, pp.1017-1022, 1052-1058, 1090-1104. Interscience Publishers, New York. London Sydney, 1962.

Shambhu P.R. "Solidification of Laboratory Waste Using Cementitious Binders" Master's Thesis, Engineering, Asian Instituted of Technology, 1990.

Shin, H.S. and Sujiwatthana, P. "Factor Affecting Solidification of Hazardous Materials." Hazardous Waste Detection Control Treatment pp. 1549-1560,1988.

——., Koo, J.K., Kim, J.O. and Yoon, S.P. "Leaching Characteristics of Heavy Metal from Solidified Sludge Under Seawater Condition." Hazardous Waste and Hazardous Materials, Vol 7 pp. 261-271, 1990.

Shively, W., Bishop, P., Gress, D. and Brown, T. "Leaching Tests of Heavy Metal Stabilized with Portland Cement." WPCF, Vol 58 pp. 234-241, 1986.

Sollars, C.J. and Perry, R., "Cement Based Stabilization of Wastes : Practical and Theoretical Considerations" Journal of the Instituation of Water and Environment Management, Vol 3 pp. 125-131, 1989.

Tsai, C.E. and Hsu, C.P. "Hazardous Waste Management Technologies." Ou-Ya Inc., Taiwan, ROC,1985.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ส่วนผสมโดยน้ำหนักขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน

ตารางที่ ก.1 : ส่วนผสมโดยน้ำหนักขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนสำหรับโลหะหนัก

องค์ประกอบ	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก* (กรัม)		
	สัดส่วนผสมโลหะหนัก/วัสดุประสาน		
	0.00	0.25	0.50
น้ำหนักนิกเกิลไนเตรท	0	25	50
น้ำหนักโลหะหนักนิกเกิล	0.00	8.03	16.06
ปูนซีเมนต์	100	100	100
ทราย	200	200	200
น้ำ	50	50	50
น้ำหนักสังกะสีไนเตรท	0	25	50
น้ำหนักโลหะหนักสังกะสี	0.00	8.62	17.24
ปูนซีเมนต์	100	100	100
ทราย	200	200	200
น้ำ	50	50	50
น้ำหนักตะกั่วไนเตรท	0	25	50
น้ำหนักโลหะหนักตะกั่ว	0.00	15.63	31.72
ปูนซีเมนต์	100	100	100
ทราย	200	200	200
น้ำ	50	50	50
น้ำหนักแคดเมียมไนเตรท	0	25	50
น้ำหนักโลหะหนักแคดเมียม	0.00	11.88	23.76
ปูนซีเมนต์	100	100	100
ทราย	200	200	200
น้ำ	50	50	50

* สำหรับการหล่อซีเมนต์ขนาด 5x5x5 ตร.ซม. จำนวน 1 ก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 : ส่วนผสมโดยน้ำหนักขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนสำหรับโลหะหนักผสม

องค์ประกอบ	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก* (กรัม)	
	สัดส่วนผสมโลหะหนัก/วัสดุประสาน	
	0.00	0.25
น้ำหนักนิกเกิลไนเตรท	0.00	6.25
น้ำหนักโลหะหนักนิกเกิล	0.00	2.00
น้ำหนักสังกะสีไนเตรท	0.00	6.25
น้ำหนักโลหะหนักสังกะสี	0.00	2.16
น้ำหนักตะกั่วไนเตรท	0.00	6.25
น้ำหนักโลหะหนักตะกั่ว	0.00	3.91
น้ำหนักแคดเมียมไนเตรท	0.00	6.25
น้ำหนักโลหะหนักแคดเมียม	0.00	2.97
ปูนซีเมนต์	100	100
ทราย	200	200
น้ำ	50	50

* สำหรับการหล่อซีเมนต์ขนาด 5x5x5 ตร.ซม. จำนวน 1 ก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

1. การศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยการทำให้เป็นก้อน

ตารางที่ ข.1 : คุณสมบัติกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น pH ก่อนเทลงพิมพ์ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ (ที่ระยะเวลาบ่มตัว 7 วัน)

สัดส่วนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน	ชนิดโลหะหนัก	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)			pH ก่อนเทลงพิมพ์		
		1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
0.00 (Control)		230.68	200.00	215.34	1.75	1.79	1.77	10	10	10
0.25	$Ni(NO_3)_2$	199.92	115.34	157.63	1.88	1.94	1.82	12	12	12
	$Zn(NO_3)_2$	40.00	40.00	40.00	2.03	1.09	1.56	8	8	8
	$Pb(NO_3)_2$	129.41	156.86	143.13	2.19	2.08	2.13	9	9	9
	$Cd(NO_3)_2$	96.00	150.83	123.42	1.92	1.88	1.90	8	8	8
	Mix	59.00	59.00	59.00	2.12	2.12	2.12	9	9	9
0.50	$Ni(NO_3)_2$	131.97	42.72	87.34	2.10	1.94	2.02	12	-	-
	$Zn(NO_3)_2$	16.64	17.80	17.22	2.08	1.99	2.03	8	-	-
	$Pb(NO_3)_2$	98.04	38.45	68.24	2.24	2.14	2.19	9	-	-
	$Cd(NO_3)_2$	44.38	20.64	32.51	2.17	2.08	2.12	8	-	-
	Mix	60.00	57.00	58.50	-	-	-	9	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 : คุณสมบัติกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น pH ก่อนเทลงพิมพ์ที่ระยะเวลาบ่มตัวต่าง ๆ

ระยะเวลาบ่มตัว (วัน)	ชนิดโลหะหนัก	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)		
		1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
1	Control	124.95	130.82	127.89	1.08	1.13	1.10
	$Ni(NO_3)_2$	102.04	104.12	103.08	1.15	1.21	1.18
	$Zn(NO_3)_2$	19.22	38.01	28.62	1.02	1.06	1.04
	$Pb(NO_3)_2$	47.06	57.14	52.10	1.01	1.03	1.02
	$Cd(NO_3)_2$	90.20	80.39	85.30	1.06	1.10	1.08
	Mix	40.00	38.43	39.22	1.08	1.12	1.10
3	Control	183.67	199.47	191.57	1.60	1.76	1.68
	$Ni(NO_3)_2$	123.03	128.00	125.52	1.87	2.09	1.78
	$Zn(NO_3)_2$	39.22	37.25	38.24	1.07	1.09	1.08
	$Pb(NO_3)_2$	104.12	96.00	100.06	1.15	1.19	1.17
	$Cd(NO_3)_2$	100.00	100.00	100.00	1.15	1.19	1.17
	Mix	52.08	44.00	48.04	1.75	1.67	1.71
7	Comtrol	236.00	230.68	233.34	1.75	1.79	1.77
	$Ni(NO_3)_2$	199.92	115.34	157.63	1.84	1.80	1.82
	$Zn(NO_3)_2$	40.00	40.00	40.00	1.59	1.53	1.56
	$Pb(NO_3)_2$	129.41	156.86	143.14	2.14	2.12	2.13
	$Cd(NO_3)_2$	96.00	150.83	123.42	1.92	1.88	1.90
	Mix	60.33	57.67	59.00	2.10	2.14	2.12
14	Control	280.00	300.05	290.03	2.20	2.24	2.22
	$Ni(NO_3)_2$	361.40	299.88	330.64	2.10	2.10	2.10
	$Zn(NO_3)_2$	38.45	42.29	40.37	2.04	2.05	2.05
	$Pb(NO_3)_2$	192.00	269.04	244.02	2.28	2.21	2.25
	$Cd(NO_3)_2$	168.00	211.64	189.73	2.23	2.07	2.15
	Mix	252.00	249.9	250.95	2.19	2.11	2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 : คุณสมบัติกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น pH ก่อนเทลงพิมพ์ที่ระยะเวลาบ่มตัวต่าง ๆ (ต่อ)

ระยะเวลาบ่มตัว (วัน)	ชนิดโลหะหนัก	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)			ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)		
		1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
28	Control	358.00	350.57	354.39	2.31	2.35	2.33
	$Ni(NO_3)_2$	470.58	422.91	446.74	2.18	2.22	2.20
	$Zn(NO_3)_2$	45.24	47.05	46.14	2.06	2.10	2.08
	$Pb(NO_3)_2$	245.09	260.18	252.63	2.38	2.34	2.36
	$Cd(NO_3)_2$	196.07	203.48	199.77	2.29	2.25	2.27
	Mix	313.72	319.10	316.41	2.25	2.17	2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้