

ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

วศ กพ
๒๖ 61

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 7 ว

ของ

นางสาววราภรณ์ กิจชัยนุกูล
นักวิทยาศาสตร์ 6ว

การศึกษาลักษณะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งปูนซีเมนต์ผสมฝุ่นทรายดำ

ผู้ดำเนินการ

- 1.นางสาววราภรณ์ กิจชัยนุกูล นักวิทยาศาสตร์ 6ว
กลุ่มงานสิ่งแวดล้อม
- 2.นายอนนท์ ป้อมประสิทธิ์ นักวิทยาศาสตร์ 6ว
กลุ่มงานฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป 2

กลุ่มงานสิ่งแวดล้อม
กองฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

บทคัดย่อ

ในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งโดยใช้ฝุ่นทรายดำ ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสามารถรับกำลังอัดได้แก่ รูปทรงและวิธีการบ่มก้อนหล่อแข็งที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้สัดส่วนของปูนซีเมนต์ต่อฝุ่นทรายดำร้อยละเท่ากับ 20 ต่อ 80 เปรียบเทียบผลของรูปทรงของก้อนหล่อแข็ง 2 รูปทรง คือ รูปทรงกระบอกและรูปทรงลูกบาศก์ และเปรียบเทียบผลของวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือการบ่มในน้ำและในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น จากการทดลองพบว่า ก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์ที่บ่มในน้ำ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 83.6, 116.4 และ 152.3 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์ที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 99.7, 139.7 และ 158.5 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกที่บ่มในน้ำ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 68.1, 93.4 และ 122.1 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 90.1, 102.6 และ 132.1 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่มาตรฐานการฝังกบของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร

ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาเป็นการนำภาคของเสียมาใช้ประโยชน์ทั้งยังใช้เป็นแนวทางในการบำบัดกากของเสียอันตรายด้วยเทคนิคการทำเป็นก้อนด้วยสารประสาน

ศษ.ร. ๑๗ กฟ
๑๐ ๕1
๑๑/๑๑/๒๐๒
๑๑/๑๑/๒๐๒

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
สารบัญ	ii
สารบัญตาราง	iii
สารบัญภาพ	iv
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาทดลอง	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์	9
1.4 ขอบเขตการศึกษา	9
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	9
1.6 ระยะเวลาดำเนินการ	10
บทที่ 2 ทฤษฎี	11
2.1 การหล่อแข็ง	11
2.2 กากของเสีย	18
2.3 การหล่อหลอมโลหะ	19
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการ	24
3.1 ตัวอย่าง	24
3.2 วัสดุอุปกรณ์	25
3.3 วิธีดำเนินการ	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง	28
บทที่ 5 วิจัยและสรุปผลการทดลอง	32
กิตติกรรมประกาศ	37
เอกสารอ้างอิง	40

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1	สัดส่วนของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ (Portland cement)	13
ตารางที่ 2	สารประกอบที่มีอยู่ในซีเมนต์หลังการเผา	13
ตารางที่ 3	ข้อกำหนดสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และข้อกำหนดเสริมของวัสดุป่อซีเมนต์ประเภทต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM C 618-91	16
ตารางที่ 4	ค่ามาตรฐานของโลหะหนักในน้ำสกัด	19
ตารางที่ 5	เปรียบเทียบค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก และรูปลูกบาศก์ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ในสภาวะการบ่มในน้ำ	29
ตารางที่ 6	เปรียบเทียบค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก และรูปลูกบาศก์ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ในสภาวะการบ่มในตู้ควบคุม อุณหภูมิและความชื้น	30

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1	แผนภาพแสดงรายละเอียดการเกิดกากของเสียในส่วนของ การเตรียมแบบหล่อทราย	23
รูปที่ 2	การทำ Quartering	24
รูปที่ 3	แผนภูมิขั้นตอนการศึกษา	26
รูปที่ 4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ที่บ่มในน้ำและบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	31

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของการศึกษาทดลอง

ประเทศไทยในปัจจุบันกำลังเผชิญกับปัญหาการกักของเสียที่นับวันจะเป็นปัญหาที่รุนแรงมากขึ้นทุกขณะ แม้ว่าจะมีหน่วยงานของรัฐหลาย ๆ หน่วยงานที่ให้ความสำคัญกับปัญหานี้ เช่น กรมควบคุมมลพิษ กรมโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น กากของเสียทุกชนิดไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นกากของเสียอันตรายเสมอไป การจำแนกประเภทของกากของเสียที่จำเป็นต้องนำกากของเสียเหล่านั้น มาทำการวิเคราะห์เพื่อแยกประเภทเสียก่อน ทั้งนี้เพื่อหาวิธีการจัดการที่เหมาะสมต่อไป

สำหรับประเทศไทยการวิเคราะห์เพื่อจำแนกประเภทกากของเสีย นั้น จะยึดตามเกณฑ์ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)^[2] ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งในประกาศฉบับนี้จะกล่าวถึงหลักใหญ่ของวิธีการวิเคราะห์รวมถึงวิธีการบำบัดกากของเสียที่เข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตราย (Hazardous Waste) ด้วย จากการวิเคราะห์กากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ของกลุ่มงานสิ่งแวดล้อม กองพิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ พบว่ามากกว่าร้อยละ 60 ของตัวอย่างกากของเสียที่ขอรับบริการจากกลุ่มงานสิ่งแวดล้อมเป็นกากของเสียทั่วไป (Non-hazardous Waste) ไม่เข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตราย นอกจากนี้ยังพบว่ากากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ทั้งนี้การเลือกแนวทางการนำกากของเสียไปใช้ประโยชน์ในด้านใดนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของกากของเสีย นั้น ๆ แต่โดยทั่วไปแล้วกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้หรืออื่น ๆ ที่มีสมบัติเป็นวัสดุพอลิเมอร์มักนำมาใช้เป็นวัสดุผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านงานหล่อแข็งและด้านงานก่อสร้าง ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของงานแต่ละด้านเพื่อให้มีสมบัติได้ตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนดในกิจกรรมแต่ละประเภท รวมถึงศักยภาพในด้านอื่น ๆ ประกอบด้วย

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของการนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมหล่อลอมโลหะมาใช้ประโยชน์ด้านการหล่อแข็ง ซึ่งกากของเสียที่นำมาศึกษาครั้งนี้คือฝุ่นทรายดำที่เป็นกากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมแบบหล่อที่ทำจากทราย โดยที่

ฝุ่นทรายดำนี้เก็บมาจากส่วนของระบบบำบัดอากาศเสียแบบถุงกรอง (Baghouse Filter) ซึ่งทางโรงงานนำไปทิ้งไว้โดยเปล่าประโยชน์

ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับดังกล่าวข้างต้นได้ระบุถึงการลดพิษและประเภทของการบำบัดกากของเสียด้วยวิธีการหล่อแข็งโดยอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASTM ซึ่งเป็นไปมาตรฐานที่ใช้ในงานก่อสร้างแต่ในบางครั้งวิธีการนี้ไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการบำบัดกากของเสียบางประเภท ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ รูปทรงของแบบหล่อและวิธีการบ่มขึ้น ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความสามารถรับกำลังอัด (Compressive strength) เพื่อให้เป็นแนวทางในการบำบัดกากของเสียด้วยวิธีการหล่อแข็งต่อไป

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบของรูปทรงและวิธีการบ่มขึ้นที่มีต่อค่าความสามารถรับกำลังอัด ทั้งนี้เนื่องจากในประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2531) ^[1] ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 เรื่องกำหนดวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์ กำจัด ฝัง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นกฎหมายที่ใช้บังคับก่อนเดือนพฤศจิกายนปีพ.ศ. 2540 นั้น มิได้มีการระบุถึงวิธีดำเนินการของการหล่อแข็ง ดังนั้นผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาด้านการหล่อแข็งในประเทศไทยจึงดำเนินการตามมาตรฐานของงานก่อสร้าง โดยรูปทรงที่ใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร และบ่มขึ้นด้วยวิธีบ่มในน้ำ แต่ในประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นประกาศที่บังคับใช้อยู่ในปัจจุบันได้กำหนดให้ใช้วิธีตาม ASTM D2633 และ D2166 ซึ่งระบุถึงรูปทรงของก้อนตัวอย่างเป็นแบบรูปทรงกระบอก ที่มีขนาดความสูง x พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 4.584 x 4.0 นิ้ว หรือ 5.6 x 2.8 นิ้ว แต่ไม่ได้กำหนดถึงวิธีการบ่มของก้อนหล่อแข็งที่แน่ชัด ในขณะที่การบำบัดกากของเสียอันตรายที่มีปัญหาด้านโลหะหนักโดยทั่วไปมักนิยมใช้วิธีการหล่อแข็งกากของเสียด้วยปูนซีเมนต์ผสมทราย หรือปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic and cement based solidification) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุปอซโซลานมีผู้นิยมทำการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก วัสดุปอซโซลานที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ ได้แก่ เถ้าลอยลิกไนต์ได้จากโรงงานไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง เถ้าแกลบ เถ้าจากการเผาขยะชุมชน นอกจากนี้ยังมีฝุ่นที่เก็บจากระบบกำจัดแบบถุงกรองในอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะจากกระบวนการเตรียมแบบหล่อที่ทำด้วยทราย ผลงานวิจัย

ต่างๆ เหล่านั้นจึงทำขึ้นภายในสภาวะบ่มในน้ำและใช้ก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์ ผลงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

Jaggi ^[26] ศึกษากระบวนการหล่อแข็งโดยใช้ซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบและผงซีเมนต์จากเตาที่โรงงานปูนซีเมนต์เพื่อกำจัดสารอันตรายจากโรงงานชุบโลหะ อุตสาหกรรมแบตเตอรี่และอุตสาหกรรมกำจัดศัตรูพืช สารอันตรายที่ทำการหล่อแข็ง คือ แคดเมียม, ตะกั่ว และอัลคริน จากของเสียที่ปนเปื้อนจากอุตสาหกรรมต่างๆ ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การชะละลายของโลหะหนักและอัลคริน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเสียในอัตราส่วนผสมและเพิ่มอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาณของแท่งซีเมนต์และการชะละลายมีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม pH ของสารสกัด การทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณของเสียและระยะเวลาบ่มนานขึ้น อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อแข็ง ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ (แคดเมียมและตะกั่ว) และอัตราส่วนผสมที่ 0.35 เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ (อัลคริน) เมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้ทำเป็นก้อน 3 ชนิด พบว่า ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบเหมาะสมสำหรับกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะและแบตเตอรี่ ปูนซีเมนต์ผสมกับของเสียที่มีแคดเมียมและผงซีเมนต์จากเตาเผาเหมาะกับของเสียที่เป็นขี้เถ้าแอมलग

Srivastava ^[29] ศึกษาเรื่องการหล่อแข็งกากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตขี้เถ้าแอมलग โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นตัวยึดประสานเพื่อหาวิธีการลดการเคลื่อนที่ของกากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตขี้เถ้าแอมलग สารฆ่าแมลงที่ทำการศึกษาได้แก่ Organo-chlorines , Organo-phosphates และ Atrazines ตัวยึดประสานที่ใช้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แกลบอัตราส่วนผสมเท่ากับ 1 ต่อ 1 ในการศึกษาการหล่อแข็งเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมทรายในอัตราส่วน 1 : 2 อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สำหรับการหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบเท่ากับ 0.65 ศึกษาสมบัติของก้อนหล่อแข็งโดยหาความสามารถรับกำลังอัดและค่าการรั่วซึม ผลการศึกษาพบว่า ค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมทรายมีค่าสูงกว่าก้อนหล่อแข็งที่ได้จากปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบ ในขณะที่ค่าการรั่วซึมของก้อนหล่อแข็งจากปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบมีค่าต่ำกว่าก้อนหล่อแข็งจากปูนซีเมนต์ผสมทราย นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดสอบค่าการรั่วซึมของกากตะกอนที่ไม่ได้ทำการหล่อแข็งมีค่าต่ำกว่าค่าการรั่วซึมของก้อนหล่อแข็ง จากผลการทดสอบนี้สรุปได้ว่าการใช้ปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็งไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำการหล่อแข็งกับกากตะกอนของสารฆ่าแมलग เนื่องจากในสภาวะที่เป็นด่างจะส่งเสริมให้มีการรั่วไหลของสารอินทรีย์มากขึ้น

Chang ^[24] วิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการหล่อแข็ง โดยใช้ซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบเปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักระหว่างการใช้อัตราส่วนซีเมนต์อย่างเดียวกับซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบ

แคลบด้วยอัตราส่วน 1 : 1 โดยใช้โลหะหนักสังเคราะห์ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง และปรอท ผลการวิจัยสรุปว่า กลไกการยึดเกาะโลหะหนักในซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของการชะละลาย พันธะการยึดเกาะที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการชะละลายโลหะหนัก การชะละลายของโครเมียมในซีเมนต์ผสมซีเมนต์สูงกว่าในซีเมนต์อย่างเดียวก่อน ในขณะที่การชะละลายของทองแดงและปรอท ในซีเมนต์อย่างเดียวก่อนสูงกว่าซีเมนต์ผสมซีเมนต์สูงก่อน ในขณะที่การชะละลายของทองแดงและปรอท ในซีเมนต์อย่างเดียวก่อนสูงกว่าซีเมนต์ผสมซีเมนต์สูงก่อน การชะละลายของทองแดงและปรอท ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่าง ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดพบว่าค่าความเป็นด่างมีค่าสูงขึ้นตามค่าการชะละลายของทองแดงและปรอท การวิจัยนี้สรุปว่าวิธีการหล่อแข็งโดยใช้ซีเมนต์อย่างเดียวก่อน เหมาะสมกับการกำจัด โครเมียมและการใช้ซีเมนต์ผสมซีเมนต์สูงก่อนเหมาะสำหรับกำจัดทองแดงและปรอท

รายงานกิจกรรมวิทยาศาสตร์บริการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน ปี 2523^[31] ทำการศึกษาเรื่องการทำซีเมนต์จากเถ้าแกลบ โดยทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบ พบว่าที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบที่ 5 : 1 ทำให้ก้อนหล่อแข็งทนแรงกดได้ดีที่สุด หลังจากได้อัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วได้ทำการทดลองต่อไปเพื่อทดลองทำเป็นคอนกรีต พบว่าที่อัตราส่วนซีเมนต์ผสมซีเมนต์สูงก่อนต่อทรายต่อหินเท่ากับ 1 : 2 : 4 และใช้น้ำ 0.6 เท่าของซีเมนต์ผสมจะให้ค่าความสามารรถรับกำลังอัดที่สูงที่สุด ขึ้นตอนสุดท้ายทำการทดลองนำเถ้าแกลบมาผสมกับซีเมนต์มาทดสอบการใช้งานพบว่าที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 70 : 30 มีความเป็นไปได้ในการผลิตซีเมนต์จากเถ้าแกลบ

Leangoon^[27] วิจัยเรื่องการหล่อแข็งจากของเสียอันตรายด้วย Cement-based techniques เพื่อหาตัวยึดประสานที่เหมาะสมในการหล่อแข็งจากตะกอนจากโรงงานฟอกหนังและโรงงานสารกึ่งตัวนำ จากตะกอนจากโรงงานฟอกหนังประกอบด้วยโครเมียมและสารอินทรีย์ ในขณะที่จากตะกอนของโรงงานผลิตสารกึ่งตัวนำประกอบด้วย ทองแดง ตะกั่วและสังกะสี ตัวยึดประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ซีเมนต์สูงก่อน ซีเมนต์ลอยและซิลิกาฟูม เปรียบเทียบค่าความสามารรถรับกำลังอัด, การรั่วซึมและค่าใช้จ่ายของก้อนหล่อแข็งด้วยตัวยึดประสานต่าง ๆ ผลการศึกษาสรุปว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของตัวยึดประสาน (Combination of cementitious materials, CCM) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อซีเมนต์สูงก่อนต่อซีเมนต์ลอย เท่ากับ 0.7 : 0.2 : 0.1 และอัตราส่วนของจากตะกอนต่อ CCM เท่ากับ 0.64 เหมาะสมสำหรับจากตะกอนจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง และอัตราส่วนของ CCM ที่เหมาะสมในการหล่อแข็งจากตะกอนจากอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำ คือ ปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์สูงก่อนต่อซีเมนต์ลอยเท่ากับ 0.7 : 0.1 : 0.2 และอัตราส่วนของจากตะกอนต่อ CCM เท่ากับ 1.37 จากผลสรุปดังกล่าวจะเห็นว่าซีเมนต์สูงก่อนและซีเมนต์ลอยมีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ในการหล่อแข็ง

สมชัย กกกำแหง^[16] ทดลองนำถ้ำลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ในงานก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต โดยใช้เป็นชั้นรองพื้นทางรองรับถนนตลอดจนทำเป็นฐานรากแผ่นรองรับลานจอดยานพาหนะขนาดใหญ่และลานกองพัสดุในบริเวณแม่เมาะ ได้มีการตรวจติดตามคุณภาพของถ้ำลอยฯ แข็งตัวเหล่านั้นพบว่าถ้ำลอยฯ ยังคงรักษาความแข็งแรงในเวลา 3 ปี ได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นผลการทดสอบสารปนเปื้อนจำพวกโลหะหนักที่ปะปนแข็งตัวซึ่งเจือปนมาจากตำแหน่งต่าง ๆ ที่นำถ้ำลอยฯ เหล่านั้นไปใช้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสิ้น

บรรณัตร์ ฉัตรวีระ และพิชัย นิमितยงสกุล^[9] ศึกษาการประยุกต์ใช้ซีเมนต์จากกะลามะพร้าว ชังข้าวโพดและเปลือกถั่วลิสง ผสมในวัสดุซีเมนต์เพื่อพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่สามารถนำมาผสมกับซีเมนต์นอกเหนือจากซีเมนต์และซีเมนต์จากฟางข้าว ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาสมบัติของเพสท์และมอร์ตาร์ที่มีซีเมนต์ดังกล่าวผสมแบบแทนที่ซีเมนต์ สมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ, ค่าความละเอียด, ส่วนประกอบทางเคมีและดัชนีกำลังเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์สมบัติของเพสท์ที่ทำการศึกษา คือ ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาสุดท้ายของซีเมนต์ผสมซีเมนต์จากเปลือกถั่วลิสงในอัตราส่วน 70 : 30 และศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมซีเมนต์จากกะลามะพร้าว ซีเมนต์จากชังข้าวโพดและซีเมนต์จากเปลือกถั่วลิสง ที่อัตราส่วนผสม ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ผสมซีเมนต์และความสามารถทนต่อสภาพกรดซัลฟูริกและกรดไฮโดรคลอริกของมอร์ตาร์ผสมซีเมนต์ดังกล่าวเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ผลการทดสอบปรากฏว่ากะลามะพร้าวไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำวัสดุซีเมนต์ได้ ยกเว้นซีเมนต์จากชังข้าวโพดและเปลือกถั่วลิสง มอร์ตาร์ผสมซีเมนต์จากชังข้าวโพดจะให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมซีเมนต์จากเปลือกถั่วลิสงให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา ในการทดสอบผลของกรดที่มีต่อมอร์ตาร์ พบว่า มอร์ตาร์ที่ผสมซีเมนต์จากเปลือกถั่วลิสงสามารถทนต่อสภาพกรดได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมซีเมนต์จากถั่วลิสง

บรรณัตร์ ฉัตรวีระ และพิชัย นิमितยงสกุล^[10] ทำการวิจัยเพื่อหาตัวแปรที่จำเป็นสำหรับผลิตซีเมนต์จากถั่วลิสงที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา ตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมซีเมนต์ คือ เวลาการเผา อุณหภูมิการเผา สภาพอากาศระหว่างการเผา อัตราการปล่อยไอน้ำในตัวลงและเวลาการอบตัว ซีเมนต์จากถั่วลิสงผสมกับปูนขาวโดยสัดส่วนซีเมนต์ต่อปูนขาวมีค่าเท่ากับ 30 : 70 ผลของตัวแปรของซีเมนต์จากถั่วลิสง ประเมินจากขีดความสามารถในการเพิ่มกำลังของมอร์ตาร์ที่ผสมซีเมนต์จากถั่วลิสงและปูนขาว วิธีการประยุกต์ใช้ซีเมนต์ดังกล่าวกับปูนขาวในบล็อกซีเมนต์ผสมดินแบบอัดแน่นถูกพบเป็นครั้งแรก ข้อสรุปที่ได้จากการวิจัยนี้ คือ ซีเมนต์จากถั่วลิสงจะมีความไวต่อการทำปฏิกิริยามากหรือน้อย ขึ้นกับ (1) สภาพอากาศระหว่างการเผาและอัตราปล่อยไอน้ำในตัวลงรวมทั้งอุณหภูมิการเผา เวลาการเผาและการอบ (2) สภาพอนุภาคของซีเมนต์จากถั่วลิสงที่ไวต่อการทำปฏิกิริยามีลักษณะเฉพาะเมื่อใช้กับซีเมนต์

ส่องดู (3) ขี้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาสามารถนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ราคาถูกและมีประโยชน์มากเมื่อใช้ร่วมกับปูนขาวในการแทนที่ในซีเมนต์เพื่อผลิตบล็อกซีเมนต์ผสมดิน

นฤมิตร คินนิมาน^[8] ศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ในการทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีให้เป็นก้อน ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและทดสอบสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน ได้แก่กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และ ค่าการซึมผ่านน้ำ นอกจากนี้ยังทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก คือ โปรท โครเมียม และเหล็ก รวมทั้งทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและประมาณค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำเป็นก้อน ผลการศึกษาสรุปได้ว่า เถ้าลอยลิกไนต์มีสมบัติเหมาะสมในการทำเป็นก้อน อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าลอยที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 50 อัตราส่วนผสมระหว่างตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 และอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 0.5 วัสดุประสานชนิดนี้สามารถใช้ได้ดีกับโครเมียมเพราะให้ค่าการชะละลายอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแต่ไม่สามารถใช้ได้ดีกับเมอร์คิวรีเนื่องจากค่าการชะละลายของเมอร์คิวรีจากก้อนหล่อแข็งเกินมาตรฐาน ค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยวิธีนี้มีค่า 3600 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนักแห้ง

กฤษณา ผากานนท์^[4] ทำการศึกษากำจัดตะกอนนิกเกิลจากกระบวนการชุบโลหะโดยวิธี Solidification ทำการทดลองโดยนำกากตะกอนนิกเกิลที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการชุบโลหะผสมกับตัวยึดประสาน 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าแกลบ และขี้เถ้าลอยลิกไนต์ นำก้อนหล่อแข็งมาทดสอบ กำลังรับแรงอัด การรั่วซึมด้วยวิธีของ Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) และวิธี Accumulation และโครงสร้างทางจุลภาคเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการตรึงนิกเกิล ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อแข็งคืออัตราส่วนตัวยึดประสานทั้ง 3 ชนิดต่อทรายเท่ากับ 1 : 2 และปริมาณตะกอนร้อยละ 10 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า 14 กก./ตร.ซม. ซึ่งเป็นค่าตามมาตรฐานกำหนด การทดสอบการรั่วซึมของนิกเกิลจากก้อนหล่อแข็งด้วยวิธี RCRA ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียวให้การรั่วซึมนิกเกิลออกจากก้อนหล่อแข็งมากที่สุด รองลงมาคือปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ ส่วนปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยลิกไนต์ให้ค่าการรั่วซึมน้อยที่สุด สำหรับการทดสอบการรั่วซึมด้วยวิธี Accumulation ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยลิกไนต์ให้ผลการทดสอบค่าการรั่วซึมของนิกเกิลออกจากก้อนหล่อแข็งน้อยที่สุด ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบและปูนซีเมนต์อย่างเดียวให้ค่าการรั่วซึมใกล้เคียงกัน จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคปรากฏว่าปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยลิกไนต์มีโครงสร้างอัดตัวกันแน่นกว่าปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ นอกจากนี้ในประเทศไทยมีปริมาณขี้เถ้าลอยลิกไนต์จำนวนมากและมีความสม่ำเสมอจึงเลือกขี้เถ้าลอยลิกไนต์มาทำการทดลองเพื่อหาศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ พบว่า ขี้เถ้าลอยลิกไนต์มีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ในการ

กำจัดนิกเกิล ที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ลอยลิกไนต์ร้อยละ 35 และปริมาณตะกอนร้อยละ 15

วิชัย มาชุตระภูท ^[14] ศึกษาการหล่อแข็งภาคตะกอนโครเมียมโดยใช้ปูนซีเมนต์และซีเมนต์แกลบ ในการศึกษาทดลองใช้โครเมียมสังเคราะห์เพื่อหาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบ (CRHA) ต่อปริมาณตะกอนที่เหมาะสม โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์แกลบเท่ากับ 1 : 1 และ น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 : 1 อัตราส่วนปริมาณตะกอนที่ทำการทดลองคือ 2, 5, 10, 20, 50, 75 และ 100 gCr/kgCRHA ทำการทดสอบการรั่วไหลด้วยวิธีมาตรฐาน (Extraction Procedure Toxicity, EPTox) ภายใต้อุณหภูมิการรั่วไหลในสารละลายกรดอะซิติก น้ำทะเลสังเคราะห์ สารละลายซัลเฟตเข้มข้น 60 ppm. สารละลายโบรอนเนดเข้มข้น 400 ppm. และน้ำปราศจากอ็อกซิเจน และศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค ผลการทดลองสรุปว่าที่อัตราส่วน 50 gCr/kgCRHA เป็นปริมาณสูงสุดที่มีค่าการรั่วซึมต่ำกว่ามาตรฐาน แต่ที่อัตราส่วน 10 gCr/kgCRHA ให้ค่าความต้านทานกำลังอัดสูงสุด การรั่วซึมของโครเมียมมีค่าสูงสุดภายใต้อุณหภูมิที่เป็นกรดอะซิติกเนื่องจากกรดไปทำลายโครงสร้างของซีเมนต์ รองลงมาคือน้ำทะเลสังเคราะห์เพราะซัลเฟตทำให้เกิดการบวม สำหรับสภาวะอื่น ๆ มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันแต่ต่ำกว่า 2 สภาวะข้างต้น

ประทีป เลียงเพชร ^[11] ศึกษาการหล่อแข็งภาคตะกอนตะกั่วโดยใช้ปูนซีเมนต์ ซีเมนต์แกลบ และซีเมนต์ลอย ซึ่งศึกษาทดลองโดยใช้ตัวยึดประสาน 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ซิลิกา ซีเมนต์แกลบ และซีเมนต์ลอย วิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงอัด การรั่วซึมด้วยวิธี EPTox การรั่วซึมตามสภาพการใช้งาน และศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค เพื่อหาชนิดและอัตราส่วนของตัวยึดประสานที่เหมาะสมในการตรึงภาคตะกอนตะกั่ว การทดลองแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ทำการตรึงตะกั่ว 1 กรัมต่อตัวยึดประสาน 1 กิโลกรัมและทราย 2 กิโลกรัม ซึ่งแบ่งตัวยึดประสานออกเป็น 7 ชุด คือ ปูนซีเมนต์ซิลิกา 100 % ปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมซีเมนต์แกลบ และปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมซีเมนต์ลอย โดยมีปริมาณซีเมนต์ 30% 50% และ 70% ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำเท่ากับ 0.55 0.65 และ 0.4 ตามชนิดของตัวประสานตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมซีเมนต์ลอย 70% เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการตรึงภาคตะกอนตะกั่ว เนื่องจากให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดและค่าการรั่วซึมของตะกั่วอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับการทดลองในชุดที่ 2 ใช้ผลการทดลองในชุดแรกมาทำการศึกษาหาปริมาณตะกั่วในภาคตะกอนที่สูงที่สุดที่ทำให้ก้อนหล่อแข็งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ความเข้มข้นของตะกั่วที่ทำการศึกษา คือ 0, 3, 5, 7, 10, 15, 25 และ 40 กรัม โดยใช้ปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมซีเมนต์ลอย 70% 1 กิโลกรัม ทราย 2 กิโลกรัม และอัตราส่วนน้ำต่อตัวยึดประสานเท่ากับ 0.4 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณตะกั่ว 15 กรัมเป็นความเข้มข้นสูงสุดที่ทำให้ก้อนหล่อแข็งมีค่าความสามารถในการรับกำลังอัดและค่าการรั่วซึมของตะกั่วจากวิธีทดสอบทั้ง 2 วิธีอยู่ใน

เกณฑ์มาตรฐาน จากการวิจัยนี้สรุปว่าซีเมนต์ยามีศักยภาพในการใช้แทนปูนซีเมนต์ซิลิกาได้ 70 % และครึ่งตะกั่วได้ 15 กรัม

ชูชัย เทียวประสงค์^[7] ศึกษาเรื่องการหล่อแข็งกาจตะกอนโครเมียมโดยใช้ซีเมนต์ผสม ซีเมนต์ 35 % เพื่อหาปริมาณโครเมียมสูงสุดที่เมื่อทำการหล่อแข็งแล้วสามารถนำไปฝังกลบได้อย่างปลอดภัย ขั้นตอนในการทดลองจะทำการศึกษาจากชุดการทดลอง 2 ชุด ชุดแรกศึกษาการหล่อแข็งกาจตะกอนโครเมียมจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมชุบผิวโลหะโครเมียมจำนวน 5 แห่ง ทำการตรวจสอบความสามารถรับกำลังอัดและการรั่วซึมของโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการบ่มขึ้นภายใน 28 วัน ในการศึกษาทดลองชุดที่ 1 สรุปว่า ก้อนหล่อแข็งสามารถรับปริมาณโครเมียมสูงสุดเท่ากับ 40 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของตัวยึดประสาน จะให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดและปริมาณการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับผลการศึกษาดทดลองในชุดที่ 2 ซึ่งใช้ปริมาณโครเมียมในกาจตะกอนเท่ากับ 40 กรัมต่อกิโลกรัมของตัวยึดประสานที่ได้จากผลการทดลองในชุดที่ 1 พบว่าก้อนหล่อแข็งที่มีค่าความสามารถรับกำลังอัดและค่าการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานมาจากโรงงานอุตสาหกรรม 4 แห่ง ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของโครเมียมในกาจตะกอนเท่ากับ 69.70, 1011.35, 106.40 และ 147.02 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับโรงงานที่มีความเข้มข้นของโครเมียมในกาจตะกอนแห่งเท่ากับ 258.11 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าความสามารถในการรับแรงอัดเท่ากับ 21.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานแต่มีค่าการรั่วซึมของปริมาณโครเมียมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำใช้ชุมชนคือ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร

จิตรรัตน์ ศรีสุโข^[6] ศึกษาการกำจัดตะกอนโลหะหนักโดยทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และทราย โดยทำการหล่อแข็งกาจตะกอนของโรงงานชุบโลหะหนัก ชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ นิกเกิล และโครเมียม ปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ สัดส่วนที่เหมาะสมของโลหะหนักที่อยู่ในกาจตะกอน ซึ่งใช้ค่าความสามารถรับกำลังอัด การชะละลายของโลหะหนักตามมาตรฐานการทดสอบความเป็นพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และการหาปริมาณโลหะหนักที่ละลายออกมาจากก้อนคอนกรีตแช่น้ำที่พีเอชเท่ากับ 4.5 และ 5.8 ตามคุณลักษณะของน้ำฝนเป็นเวลา 5 ถึง 10 วัน เป็นดัชนีบ่งชี้ ผลการศึกษาพบว่าค่าความสามารถรับกำลังอัดลดลงตามอัตราส่วนของกาจตะกอนที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต สัดส่วนที่เหมาะสมของปูนต่อกาจตะกอนต่อทราย คือ 1.5 : 1.0 : 2.5 โดยน้ำหนัก สำหรับการหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และการศึกษาปริมาณโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดที่ละลายออกมาจากก้อนคอนกรีตแช่น้ำที่พีเอช 4.5 และ 5.8 ให้ผลไม่แตกต่างกัน ระยะเวลาในการบ่มมีผลต่อการละลายออกมาของโครเมียมแต่ไม่มีผลต่อการละลายออกมาของนิกเกิล

วราภรณ์ กิจชัยนุกูล^[13] ทำการวิจัยเรื่อง การศึกษาสมบัติทรายดำจากอุตสาหกรรมหล่อ หลอมโลหะเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมกับปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็ง โดยทำการศึกษถึงสมบัติของฝุ่น ทรายดำซึ่งเป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะ พบว่าฝุ่นทรายดำจัดเป็นกากของ เสียทั่วไปไม่เข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตรายและมีสมบัติเป็นวัสดุป่อชโซลานสามารถนำมาใช้ เป็นวัสดุผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็งได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำฝุ่นทรายดำนี้ไปผสม กับปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนฝุ่นทรายดำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 80 : 20 ดริงปรอทที่ได้จากการตก ตะกอนน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ซีไอดีในรูปของปรอทซัลไฟด์ โดยปรอทที่สามารถดริงได้สูงสุด ในการทดลองนี้อยู่ที่ 25.29 ไมโครกรัม

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งปูนซีเมนต์ผสมฝุ่นทรายดำ โดยวิธี pozzolanic and cement based solidification technique

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งโดยใช้ฝุ่นทรายดำ โดยวิธี pozzolanic and cement based solidification technique

1.4.2 ศึกษาผลของรูปทรงของก้อนหล่อแข็งที่มีต่อค่าความสามารถรับกำลังอัด โดยทำการ ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร กับก้อนหล่อแข็งรูป ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความสูงเท่ากับ 5 x 10 เซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

1.4.3 ศึกษาผลของวิธีการบ่มก้อนหล่อแข็งที่มีต่อค่าความสามารถรับกำลังอัด โดยทำการ ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการบ่มในน้ำกับวิธีการบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 23 °C และความชื้นที่ร้อยละ 95 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการกำหนดมาตรฐานวิธีการกำจัดกากของเสียด้วยวิธีหล่อแข็ง โดยใช้ Pozzolanic and cement based solidification technique

1.5.2 เป็นแนวทางในการนำกากของเสียที่ไม่เป็นอันตรายกลับมาใช้ประโยชน์ (Utilization) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการลดปริมาณของเสีย (Waste minimization)

1.5.3 เป็นการส่งเสริมให้ภาคอุตสาหกรรมดำเนินการตามมาตรฐาน ISO 14000 ในเรื่อง การจัดการกากของเสีย อันจะยังผลให้สินค้าที่ผลิตขึ้นภายในประเทศสามารถส่งออกไปยังต่างประเทศได้โดยปราศจากข้อขัดแย้ง

1.6 ระยะเวลาดำเนินการ : มกราคม 2543 – สิงหาคม 2543

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ การหล่อแข็ง กากของเสียและแหล่งกำเนิดของกากของเสียในกระบวนการหลอมโลหะที่นำมาใช้ในการศึกษา ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังต่อไปนี้

2.1 การหล่อแข็ง

2.1.1 เทคนิคการหล่อแข็ง

การหล่อแข็งไม่ใช่วิธีการกำจัดของเสีย แต่เป็นการเปลี่ยนรูปของเสียให้คงทนต่อสภาวะแวดล้อมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์หรือลดความเป็นพิษลง การหล่อแข็งเป็นกระบวนการที่ใช้ก่อนการกำจัดขั้นสุดท้ายของกระบวนการบำบัดทั้งหมด ซึ่งการหล่อแข็ง เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดโดยเกิดพันธะทางเคมีหรือการตรึง (Fixate) หรือการกักเก็บ (Encapsulate) ของเสียไว้ในโครงผลึกของของแข็งที่เกิดขึ้น วิธีการตรึงทำได้ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ โดยนำของเสียมาผสมกับสารหรือวัสดุที่สามารถจับตัวกันเป็นของแข็งได้ ส่วนการกักเก็บเป็นวิธีการทางกายภาพโดยใช้สารห่อหุ้มของเสียไว้ใน

จุดประสงค์ของทั้ง 2 วิธีข้างต้นเพื่อทำให้ของเสียอยู่ในสภาวะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ลดการซึมผ่านของของเสียหรือรั่วไหลออกสู่ภายนอกได้น้อยและของแข็งที่ได้สามารถรับกำลังอัดหรือมีความแข็งแรงพอสมควร สามารถนำไปกลบฝังได้

กระบวนการหล่อแข็งที่ใช้ในการบำบัดของเสีย^[4] ประกอบไปด้วย

1. Cement - based techniques
2. Lime - based techniques
3. Thermoplastic techniques (Bitumen , Paraffin หรือ Polyethylene)
4. Thermosetting techniques (Organic polymer)
5. Encapsulation techniques
6. Self - cementing (Pozzolan) techniques
7. Glassification

วิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันทั่วไป วัสดุหาได้ง่าย ราคาถูกและใช้ได้กับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic waste) หลายชนิด เช่น โลหะหนักต่าง ๆ เป็นต้น

สำหรับกระบวนการอื่น ๆ เป็นกระบวนการที่ใช้กับของเสียที่เป็นปัญหามาก ๆ เช่นกากกัมมันตภาพรังสี (Radioactive waste) หรือของเสียที่มีสารอินทรีย์อยู่สูง รวมทั้งมีราคาในการบำบัดสูงจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการบำบัดของเสียทั่วไป

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะ Cement - based techniques

2.1.2 Cement - based techniques

เป็นกระบวนการที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมร่วมกับวัสดุพิษโซลานอื่น ๆ เช่น ขี้เถ้าลอย ขี้เถ้าแกลบหรือฝุ่นซีเมนต์ เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพและลดการรั่วไหลจากก้อนหล่อแข็งที่ได้ เทคนิคนี้สามารถใช้กับของเสียที่มีสารอินทรีย์ปนอยู่ได้สูงถึง 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำไปกลบฝังได้อย่างปลอดภัยจึงทำให้วิธีการหล่อแข็งเป็นที่นิยมในการบำบัดกากตะกอนโลหะหนักทั่วไป

การนำกากของเสียแต่ละชนิดมาบำบัดด้วยวิธีการหล่อแข็ง จำเป็นต้องผ่านการทดสอบศักยภาพในการหล่อแข็งที่เหมาะสม กากของเสียที่สามารถนำมาบำบัดด้วยวิธีนี้ได้แก่ เศษโลหะ (Steelmill) ของเสียจากโรงงานชุบโลหะและหลอมตะกั่ว ของเสียจากโรงฟอกย้อม จากหอหล่อเย็น ถ้ำจากเตาเผาของเสีย ค่ะคะไลต์ที่เสื่อมสภาพ ออกไซด์ที่เสื่อมสภาพ กากตะกอนจากโรงงานผลิตอาหาร กากแร่และกากตะกอนจากเครื่องกำจัดก๊าซ (Gas scrubber)

2.1.3 ตัวประสาน (Binding materials)

ในกระบวนการหล่อแข็งด้วยวิธี Cement - based techniques วัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน คือ

ก) ซีเมนต์^[20, 21]

ตามที่กำหนดไว้ใน ASTM C150 ชนิดของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานมีอยู่ 5 ชนิดด้วยกัน ซึ่งจะกล่าวโดยย่อดังนี้

ชนิดที่ I เป็นซีเมนต์ธรรมดาหาได้ทั่วไป และใช้งานส่วนมาก

ชนิดที่ II มีปริมาณไตรแคลเซียม อะลูมิเนต (C_3A) น้อยกว่าในชนิดที่ I ให้ความร้อนน้อยกว่าและมีความต้านทานสารพวกซัลเฟตได้สูงกว่า แต่ปริมาณไตรแคลเซียม อะลูมิเนต ต้องไม่เกินร้อยละ 8

ชนิดที่ III เป็นซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ผลิตโดยใช้การบดอย่างละเอียด และ/หรือเพิ่มปริมาณไตรแคลเซียม ซิลิเกต (C_3S) และไตรแคลเซียม อะลูมิเนต ขึ้นอีก

ชนิดที่ IV เป็นซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ทำขึ้นโดยใช้ไตรแคลเซียม อะลูมิเนตน้อย แต่ใช้ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (C_3S) มาก ซีเมนต์ชนิดนี้ใช้กันมากในการก่อสร้างพวกคอนกรีตหนา เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าขณะแข็งตัว

ชนิดที่ V เป็นชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้ดี เพราะมีปริมาณไตรแคลเซียม

อะลูมิเนียมเล็กน้อยมาก ปกติไม่เกินร้อยละ 5 แต่ถ้าจะให้ดีไม่ควรให้เกินร้อยละ 4

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อะลูมิเนียม และเหล็ก เป็นต้นซึ่งสัดส่วนของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ (Portland cement)^[15] โดยทั่วไปมีส่วนประกอบโดยน้ำหนัก ดังนี้

ตารางที่ 1 สัดส่วนของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ (Portland cement)

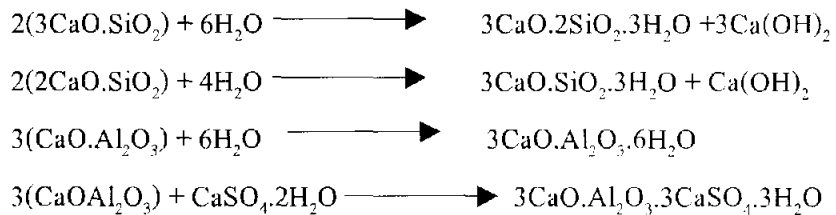
สารประกอบออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	63.8
SiO ₂	20.2
Al ₂ O ₃	5.4
Fe ₂ O ₃	2.9
SO ₃	2.6
MgO	1.5
K ₂ O	0.5
Na ₂ O	0.3

สารเหล่านี้ทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบ สารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิดที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์หลังการเผาแล้ว มีดังนี้

ตารางที่ 2 สารประกอบที่มีอยู่ในซีเมนต์หลังการเผา

สารประกอบ	สูตรเคมี	สัญลักษณ์
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์	4CaO.Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

เมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำจะกลายเป็นซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ทำให้เกิดความเหนียว และเกาะแน่นกับวัสดุผสม ออกไซด์ในซีเมนต์จะเปลี่ยนรูปเป็นไฮเดรตเมื่อถูกน้ำ ดังสมการ



ค่าความเป็นด่างที่เกิด โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงความสามารถเป็นบัฟเฟอร์ (Buffer) ซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าความเป็นด่างสูง และมีพื้นผิวออกไซด์ไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมกับภาวะสำหรับการตกผลึก Amphoteric metal และการดูดซับโลหะ กลไกในการยึดจับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ในของเสียที่ถูกทำให้แข็งตัวนั้นแตกต่างกันไป รูปแบบการยึดจับของโลหะหนักกับของเสียที่แข็งตัวพอสรุปได้ดังนี้

- 1) อยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในของของเสียแข็งตัว
- 2) ถูกเกาะติดบนผนังของรูพรุน
- 3) ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์

ในกรณีที่โลหะหนักถูกล้อมอยู่ในของแข็งหรือเกาะติดอยู่ที่ผิวรูพรุน ความสามารถในการชะละลายของโลหะหนักมีค่าสูงกว่าในกรณีที่โลหะหนักทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์

ข) วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials)

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 - 91^[2,21] “ปอซโซลาน” คือวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งโดยตัวของมันเองไม่มีสมบัติในการยึดประสาน (Cementitious properties) สารปอซโซลานทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน

การนำสารปอซโซลานมาใช้เป็นวัสดุซีเมนต์ โดยการนำวัสดุที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟมาใช้ร่วมกับหินปูนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบแล้วทำให้สามารถปรับปรุงคุณภาพของมอร์ตาร์ให้ดีขึ้น ทำให้มอร์ตาร์แข็งตัวได้ในน้ำ เมื่อมีการค้นพบวัสดุที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมของดินในตำบลโลกัสเดียวกับเมืองปอซซุโอลี (Pozzuoli) และสามารถนำตะกอนดังกล่าวมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของมอร์ตาร์ได้ จึงเรียกวัดสคูที่นำมาปรับปรุงคุณภาพนี้ว่า “ปอซโซลาน (Pozzolan)”^[5]

ตาม ASTM C 618 - 91 จำแนกสารประกอบปอซโซลานเป็น 3 กลุ่ม

คือ

1) Class N ได้แก่สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural pozzolans) คือ วัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ (Volcanic tuff) และหินพูน (Pumicite) เป็นต้น

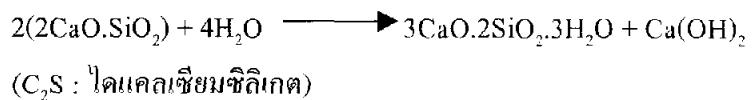
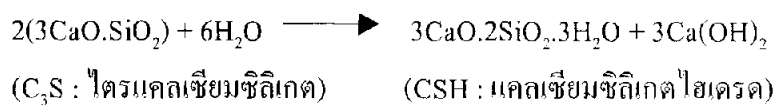
2) Class F ได้แก่ สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolans) คือ วัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัสดุคิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ จี้อ้าหิน จี้อ้ากลบ เป็นต้น

3) Class C เป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัสดุคิบเช่นเดียวกับข้อ 2 แต่มีข้อกำหนดสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน

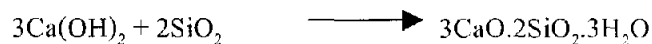
ในการจัดประเภทของวัสดุปอซโซลานมีข้อกำหนดสมบัติทางด้านกายภาพ ด้านเคมี และสมบัติเสริมบางประการ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3

การนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นได้เมื่อสารประกอบซิลิกาในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเพื่อเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยานี้ซิลิกาต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน ถ้าอยู่ในรูปผลึกจะมีผลต่อปฏิกิริยาช้ามาก อัตราการเพิ่มกำลังหรือรับแรงอัดขึ้นอยู่กับความไวในการทำปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลาน (Pozzlanic activity) และอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนของวัสดุปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่าง ร้อยละ 15 - 40

ปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่เกิดขึ้น คือ ขั้นตอนที่ 1



ขั้นตอนที่ 2



(CAH : แคลเซียมอะลูมินาไฮดรต)

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และข้อกำหนดเสริมของวัสดุ
ปอซโซลานประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 91^[22]

พารามิเตอร์	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
<u>Physical Requirements</u>			
Fineness :			
Amount retained when wet-sieved on 45 μm . (No.325)sieve, max., %	34	34	34
Strength activity index :			
With portland cement, at 7 days, min, percent of control	75	75	75
With portland cement, at 28 days, min, percent of control	75	75	75
With lime, at 7 days, min, psi (kPa)	800 (5500)	800 (5500)	-
Water requirement, max, percent of control	115	105	105
Soundness :			
Autoclave expansion or contraction, max, %	0.8	0.8	0.8
Uniformity requirements :			
The specific gravity and fineness of individual samples shall not vary from the average established by the ten preceding tests, or by all preceding tests if the number is less than ten, by more than :			
Specific gravity, max variation from average, %	5	5	5
Percent retained on 45 μm . (No.325), max variation, percentage points from average	5	5	5
<u>Supplementary Optional Physical Requirement</u>			
Multiple factor, calculated as the product of loss on ignition and fineness, amount retained when wet-sieved on No.325 (45 μm) sieve, max,%	-	255	-

ตารางที่ 3 ต่อ

พารามิเตอร์	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
In addition, when air-entraining concrete is specified, the quantity of air-entraining agent required to produce an air content of 18.0 vol % of mortar shall not vary from the average established by the ten preceding tests or by all preceding tests if less than ten, by more than, %	20	20	20
Increase of drying shrinkage of mortar bars at 28 days, max, %	0.03	0.03	0.03
Reactivity with Cement Alkalies :			
Reduction of mortar expansion at 14 days, min, %	75	-	-
Mortar expansion at 14 days, max, %	0.020	0.020	0.020
<u>Chemical Requirements</u>			
Silicon dioxide (SiO ₂) plus aluminum oxide (Al ₂ O ₃) plus iron oxide (Fe ₂ O ₃), min, %	70.0	70.0	50.0
Sulfur trioxide (SO ₃), max, %	4.0	5.0	5.0
Moisture content, max, %	3.0	3.0	3.0
Loss on ignition, max, %	10.0	6.0	6.0
<u>Supplementary Optional Chemical Requirement</u>			
Available alkalis, as Na ₂ O, max, %	1.5	1.5	1.5

จากสมการจะเห็นว่า วัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเพื่อทำให้เกิดสารซีเมนต์ในการยึดประสานในชั้นตอนที่ 2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในชั้นตอนแรกเกิดขึ้นช้า ดังนั้นการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงแรก ๆ ของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานจะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อเวลาผ่านไปกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาในวัสดุปอซโซลานแล้วเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์

2.2 กากของเสีย

2.2.1 คำจำกัดความของกากของเสีย (Solid waste)¹⁸¹

กากของเสีย (Solid waste) หมายถึง เศษของเหลือใช้ที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ และถูกทิ้งออกไปสู่ระบบของการจัดการที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อม กากของเสียเหล่านี้ ได้แก่ มูลฝอย สิ่งปฏิกูล และของเสียที่เป็นอันตราย ในปัจจุบันมีกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการจัดการกากของเสียเหล่านี้หลายฉบับ ได้แก่ พระราชบัญญัติ สาธารณสุข พ.ศ. 2484 พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 และพระราชบัญญัติ วัตถุมีพิษ พ.ศ. 2510 ซึ่งได้มีการออกข้อบัญญัติภายใต้กฎหมายดังกล่าว เช่น ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2513 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 พ.ศ. 2531 ประกาศกระทรวง อุตสาหกรรมฉบับที่ 57 พ.ศ. 2533 ตลอดจนกฎหมายและข้อบัญญัติที่ ประกาศใช้ภายใต้พระราชบัญญัติฉบับอื่น ๆ อีก

คำจำกัดความของกากของเสียที่สำคัญได้แก่

มูลฝอย หมายถึง เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร เศษสินค้า แก้ว มูลสัตว์และซากสัตว์ รวมตลอดควัสดอื่น ๆ ใด ซึ่งกีดขวางจากถนน ตลาด ที่เลี้ยงสัตว์หรือที่อื่น ๆ

สิ่งปฏิกูล หมายถึง อุจจาระและปัสสาวะ รวมตลอดถึงควัสดอื่นใดซึ่งเป็นสิ่งสกปรกโสโครกและมีกลิ่นเหม็น

ของเสียที่เป็นอันตราย หมายถึง ของเสียหรือสิ่งที่เจือปนด้วยของเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นหรือสมบัติทางด้านกายภาพ เคมี หรืออื่น ๆ ที่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการตาย หรือการเจ็บป่วย ทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด เก็บกัก หรือกำจัด

2.2.2 การจัดประเภทกากของเสีย

การจำแนกประเภทกากของเสียว่าเป็นกากของเสียทั่วไปหรือกากของเสียอันตราย ทำการทดสอบจำแนกประเภทของกากของเสีย โดยทดสอบการชะละลายของโลหะหนักตามวิธีของประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม แล้วทำการตรวจสอบหาปริมาณโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ดังนี้ คือ ซิลเวอร์ (Ag) อาร์เซนิก (As) แบเรียม (Ba) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) ซีลีเนียม (Se) และเมอร์คิวรี (Hg) เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วิเคราะห์ได้จากกากของเสียตัวอย่างกับค่ามาตรฐานตามตารางที่ 4 ถ้าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกากของเสียต่ำกว่าค่ามาตรฐาน แสดงว่า กากของเสียเป็นกากของเสียทั่วไป (Non-hazardous waste) แต่ถ้าค่าที่ได้จาก

การวิเคราะห์ตัวอย่างกากของเสียมากกว่าค่ามาตรฐาน แสดงว่าเป็นกากของเสียอันตราย
(Hazardous waste)

ตารางที่ 4 ค่ามาตรฐานของโลหะหนักในน้ำสกัด

ลำดับ	ชื่อสาร	ค่ามาตรฐาน(mg/l)	
		US EPA ^[25]	กรมโรงงานอุตสาหกรรม ^[2]
1.	อาร์เซนิก (As)	5.0	5.0
2.	แบเรียม (Ba)	100.0	100.0
3.	แคดเมียม (Cd)	1.0	1.0
4.	โครเมียม (Cr)	5.0	5.0
5.	ตะกั่ว (Pb)	5.0	5.0
6.	เมอร์คิวรี (Hg)	0.2	0.2
7.	ซีลีเนียม (Se)	1.0	1.0
8.	ซิลเวอร์ (Ag)	10.0	10.0

2.3 การหล่อหลอมโลหะ

2.3.1 กระบวนการหล่อหลอม

ขั้นตอนกระบวนการผลิตมีดังนี้

2.3.1.1 การหลอมเหล็ก (Melting) วัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น เศษเหล็กเหนียว เศษเหล็กสแตนเลส เป็นต้น ถูกป้อนเข้าเตาหลอม อัตราส่วนผสมของวัสดุที่ป้อนเข้าเตาหลอมขึ้นอยู่กับชิ้นงานแต่ละขนาด น้ำเหล็กจากเตาหลอมจะถูกนำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป สมบัติของน้ำเหล็กที่ต้องการคือ มีอุณหภูมิประมาณ 1,300 - 1,600 °C ความหนืดซึ่งมีค่าต่ำที่อุณหภูมิสูง ถ้าค่าความหนืดสูงจะทำให้ น้ำเหล็กเสียความสามารถในการไหล การไหลของน้ำเหล็กและความตึงผิวของน้ำเหล็กเนื่องจากเมื่อน้ำเหล็กสัมผัสกับแบบหล่อทรายทำให้มีแรงต้านทานไม่ให้น้ำเหล็กซึมผ่าน^[19]

2.3.1.2 การเตรียมทรายสำหรับทำแบบหล่อ (Sand preparation)^[12] การเตรียมทราย เตรียมโดยนำเอาทรายที่มีสมบัติตามที่กำหนด กล่าวคือ ทรายที่นำมาทำแบบหล่อต้องมีสมบัติ ดังนี้ คือ

ก) ขึ้นรูปได้ง่าย (Formability) และทำแบบหล่อได้สะดวก โดยที่มีความแข็งแรงพอ แบบหล่อที่ทำเสร็จแล้วจะต้องแข็งแรงพอที่จะยกไปได้และเทน้ำหลักเข้าไปได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ดังนั้นจึงต้องมีความแข็งแรงทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

ข) จะต้องให้ก๊าซซึมออกได้ (Permeability) สะดวกพอ ถ้าอากาศหรือก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สามารถซึมผ่านเม็ดทรายออกไปจากแบบหล่อเร็วพอในขณะที่น้ำโลหะเหลวอาจเกิดจุดเสียดประเทรุโหว่ที่เกิดจากการหดตัวและรูพรุนที่ผิว

ค) ขนาดของเม็ดทรายและปริมาณของเม็ดทรายแต่ละขนาดต้องเหมาะสมถ้าใช้ทรายละเอียดทำแบบหล่อผิวของชิ้นงานละเอียดดี แต่ถ้าเม็ดทรายละเอียดเกินไปทำให้ ก๊าซออกไม่ได้ถูกกักไว้ภายในทำให้เกิดรูพรุน (Blow hole) ดังนั้นต้องจัดให้ขนาดของเม็ดทรายและปริมาณของเม็ดทรายแต่ละขนาดเหมาะสม ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงทั้งสองประเด็นข้างต้น

ง) ต้องมีความทนไฟ (Refractoriness) สูงพอ ก็คือต้องทนไฟเมื่อน้ำหลักอุณหภูมิสูงลงในแบบหล่อ

จ) มีส่วนผสมที่เหมาะสม คือ เมื่อเม็ดทรายสัมผัสกับน้ำหลัก อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพ (Physical) และทางเคมี ดังนั้นจึงไม่ควรมีส่วนผสมใด ๆ ที่จะทำให้เกิดก๊าซหรือที่จะละลายไปกับน้ำหลัก

ฉ) นำมาใช้ได้อีกทรายที่ดีจะต้องใช้ได้หลายครั้งเพื่อความประหยัด

ช) มีราคาถูก

เมื่อได้ทรายที่มีสมบัติตามที่กำหนดแล้วจึงนำมาผสมกับส่วนผสมอื่น ๆ เช่น Bentonite ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ผงถ่าน (Coal dust) เป็นส่วนผสมพิเศษซึ่งทำให้ผิวงานหล่อมีความละเอียดขึ้น และน้ำเป็นดิน นำมาผสมในเครื่องผสมทราย เพื่อคลุกเคล้าส่วนผสมต่าง ๆ ให้เข้ากันเป็นอย่างดีแล้วนำไปตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความโปร่ง ความสามารถในการอัดตัว และความสามารถรับกำลังอัด

2.3.1.3 การเตรียมแบบหล่อ (Moulding line) การเตรียมแบบสำหรับการหล่อ คือนำแบบทรายที่ได้จากเครื่องปั้นแบบซึ่งมีที่สำหรับเทน้ำหลักให้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องการ และมีช่องระบายอากาศร้อนหลังเทน้ำหลักลงไปแบบทรายที่ได้จะเกิดการอัดทรายเข้ากับแบบชิ้นงานที่เรียกว่า Pattern เมื่อดึงเอาแบบออกจะปรากฏรอยนุ่มบนทราย เป็นรูปชิ้นส่วนตามต้องการ หลังจากการเทน้ำหลักลงไปแบบและปล่อยให้เหล็กเย็นลงแล้วจึงแกะแบบออกและนำชิ้นงานหล่อไปผ่านขั้นตอนอื่นต่อไป

2.3.1.4 การรื้อชิ้นงานออกจากแบบทราย (Shake-out) เป็นการเอางานหล่อออกจากแบบทราย โดยวิธีใช้เครื่องเขย่า หรือเรียกว่า Shake-out ให้แบบทรายแตก ชิ้นงานที่เป็น

เหล็กแข็งตัวแล้วถูกแยกออกจากแบบทรายไปผ่านกระบวนการอื่นต่อไป ส่วนทรายที่ได้จากการรีไซเคิลจะถูกนำกลับไปใช้ใหม่

2.3.1.5 การแยกชิ้นงานออกจากระบบงานหล่อ (Breaking) เป็นวิธีการทำให้ส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานออกจากระบบทางวิ่งของแบบงานหล่อ ในส่วนนี้ได้ชิ้นงานที่เป็นผลิตภัณฑ์กับด้านทางวิ่งและส่วนอื่น ๆ ที่เป็นระบบงานหล่อ ซึ่งผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานก็จะถูกส่งไปผ่านกระบวนการอื่นต่อไป ส่วนทางวิ่งและส่วนอื่น ๆ ที่เป็นระบบงานหล่อจะถูกนำกลับไปหลอมใหม่ เรียกว่า Returned scrap

2.3.1.6 การคัดแยกขนาดชิ้นงาน (Sorting) เป็นการคัดแยกขนาดของชิ้นงานซึ่งในกระบวนการผลิตชิ้นงานมีหลายขนาดที่แตกต่างกัน จึงต้องมีการคัดแยกไม่ให้เกิดปะปนกันแล้วจึงส่งไปผ่านขั้นตอนอื่นต่อไป

2.3.1.7 การอบชุบความร้อน (Heat treatment) หลังจากผ่านการหล่อแล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกนำไปผ่านกระบวนการอบชุบความร้อนเพื่อให้เหล็กมีคุณภาพตามต้องการ ทำโดยนำผลิตภัณฑ์ไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 850 °C นำไปชุบที่อ่างน้ำมันชุบ วิธีการนี้ทำให้เหล็กมีโครงสร้างเปลี่ยนไป และเกิดโครงสร้างใหม่ ทำให้ได้สมบัติตามต้องการก่อนส่งจำหน่ายต่อไป ในชิ้นงานบางขนาดเมื่ออบให้ความร้อนแล้วจะถูกนำไปเป่าด้วยลม เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้ได้ตามต้องการ

2.3.1.8 การอบเพื่อทำลายความเครียด (Tempering furnace) ชิ้นงานบางขนาดจะนำไปผ่านกระบวนการอบเพื่อทำลายความเครียด ทำให้เหล็กมีคุณภาพดีขึ้นก่อนส่งจำหน่ายต่อไป

2.3.1.9 การบรรจุ (Packing) ชิ้นงานที่ดีจะถูกบรรจุลงในภาชนะเหล็กก่อนส่งจำหน่าย

2.3.2 ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในโรงหล่อหลอมโลหะ

ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในโรงหล่อหลอมโลหะได้แก่

2.3.2.1 เขม่า คาร์บอนจากคิวโปลา หรือเตาไฟฟ้า

2.3.2.2 ฝุ่นจากทรายทำแบบ

2.3.2.3 กลิ่นเหม็นจากน้ำมันหรือเรซินที่ใช้ในการทำไส้แบบ

2.3.2.4 เสียงและความสั่นสะเทือนของเครื่องทำแบบหล่อหรือเครื่องสันทราย

ออก

2.3.2.5 น้ำสกปรกปนน้ำมันหรือน้ำใช้ในการชำระล้าง

2.3.2.6 กากของเสียที่เหลือจากการหล่อหลอม

2.3.2.7 ทรายทำแบบที่หมดสภาพแล้ว

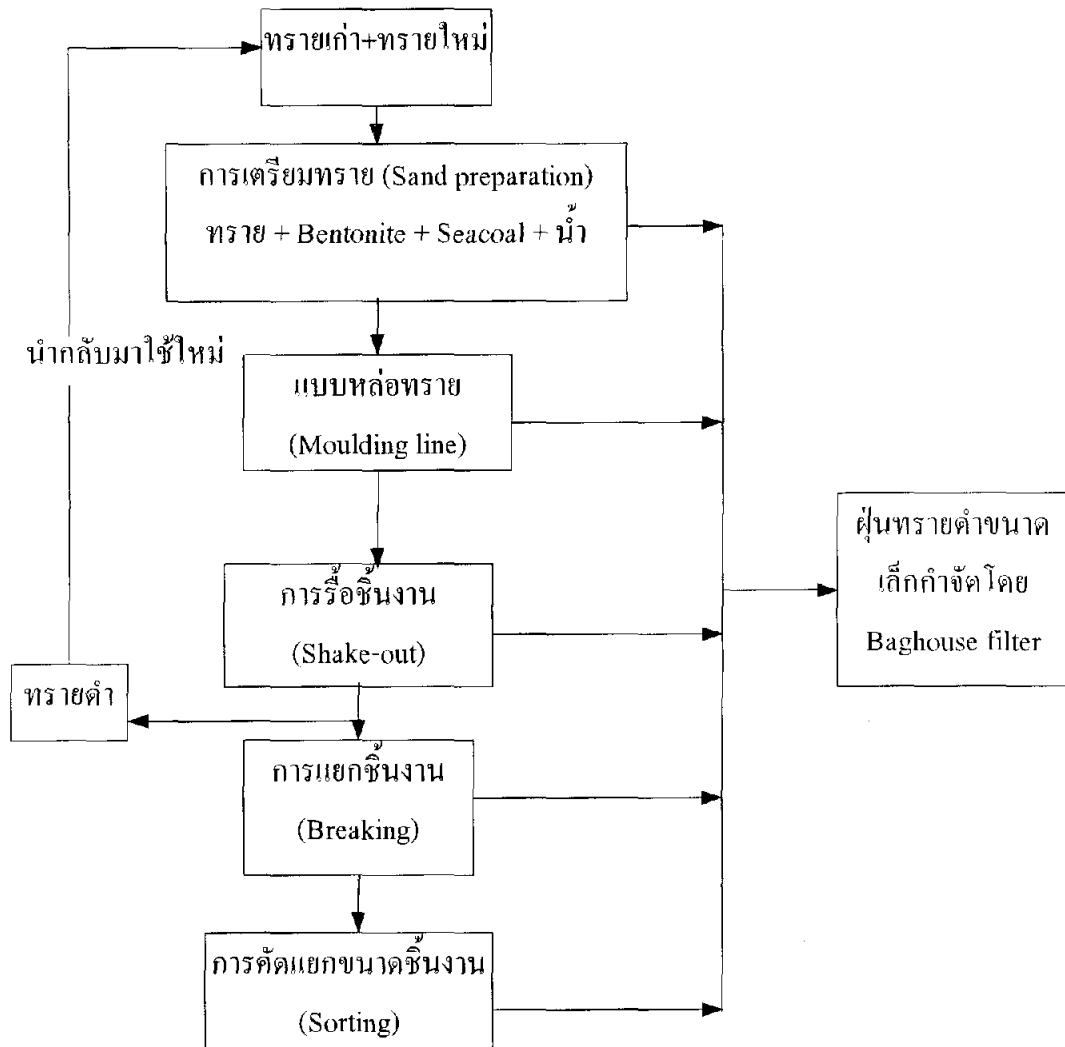
ปัญหาเหล่านี้มีผลเสียต่อสุขภาพของคนงานในโรงหล่อ และต่อผู้อยู่อาศัยใกล้ โรงหล่อดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจัดการและกำจัดสิ่งซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ เช่น การกำจัดฝุ่นจากเตาหลอม อาจใช้ เครื่องดักฝุ่นชนิดลมหมุน (Cyclone) เครื่องดักฝุ่นชนิดเปียก (Wet scrubber) หรือ เครื่องดักฝุ่นชนิดถุงกรอง (Baghouse filter) ในกรณีที่ใช้เตาไฟฟ้าซึ่งมีฝุ่นขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ เครื่องกำจัดฝุ่นที่เกิดจากเตาหลอมประเภทนี้จึงใช้เครื่องดักฝุ่นชนิดถุงกรอง สำหรับเครื่องดักฝุ่นที่ใช้กำจัดฝุ่นจากการเตรียมแบบหล่อทราย โดยทั่วไปใช้ Cyclone หรือ Wet scrubber แต่เครื่องดักฝุ่นทั้งสองประเภทนี้ไม่สามารถกำจัดฝุ่นขนาดเล็กได้ ดังนั้นจึงอาจใช้ เครื่องดักฝุ่นชนิดถุงกรองเพิ่มขึ้นมา ในการกำจัดน้ำเสียส่วนใหญ่ใช้กระบวนการตกตะกอนด้วย สารเคมี ตะกอนที่ได้นำไปกำจัดน้ำออกแล้วนำไปกำจัดรวมกับฝุ่นที่เก็บได้จากเครื่องดักฝุ่น น้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนต้องนำไปปรับค่า pH ก่อนปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม ในการแก้ปัญหา เสียง โดยทั่วไปมักสร้างฝากรอบเครื่องที่ทำให้เกิดเสียง ใช้ที่อุดหูหรือที่ครอบหู เป็นต้น

2.3.2 กากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อหลอม

กากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อหลอมโลหะทั้งที่เป็นเหล็กกล้าและ ไม่เป็นเหล็กกล้า จากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต พอสรุปได้ดังนี้

- ก) กากของเสียจากระบบกำจัดฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากเตาหลอม
- ข) กากของเสียที่เหลือจากการหล่อหลอม
- ค) กากของเสียที่เกิดจากแบบหล่อทรายที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ หรือที่มีชื่อเรียกทั่วไปว่า “ทรายดำ”
- ง) กากของเสียที่เกิดจากกระบวนการเตรียมแบบหล่อทรายหรือที่เรียกทั่วไป ว่า “ฝุ่นทรายดำ” กากของเสียชนิดนี้มีขนาดเล็กกว่า 0.5 mm ส่วนใหญ่จะเก็บรวบรวมโดยใช้ถุง กรอง (Baghouse filter)

โดยทั่วไปโรงงานหล่อหลอมโลหะประเภทนี้ได้มีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ ดัง ที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.2 ในการกำจัดปัญหาเรื่องฝุ่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการหลังจากนั้นจึงนำไป ทิ้งในบริเวณที่ทางโรงงานได้จัดเตรียมไว้ โดยนำไปกองทิ้งไว้



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงรายละเอียดการเกิดกากของเสียในส่วนของ การเตรียมแบบหล่อทราย

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการ

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งโดยใช้ฝุ่นทรายดำ มีวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการ ดังต่อไปนี้

3.1 ตัวอย่าง

3.1.1 แหล่งที่มาของตัวอย่าง

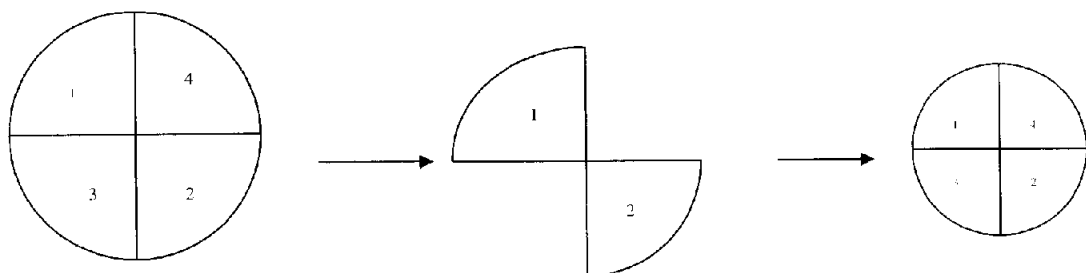
บริษัท นวโลหะอุตสาหกรรม จำกัด ตั้งอยู่ที่ 19 หมู่ 3 ถนนสุวรรณศร ตำบลบัวลอย อำเภอหนองแค จังหวัด สระบุรี

3.1.2 ตัวอย่างที่นำมาศึกษา ได้ทำการเก็บตัวอย่าง คือ

ฝุ่นทรายดำจาก Baghouse

3.1.3 การเก็บตัวอย่าง

การสุ่มตัวอย่าง ทำการสุ่มตัวอย่างด้วยวิธีแบ่งสี่ (Quartering) เพื่อให้ได้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถใช้เป็นตัวแทนของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ โดยนำตัวอย่างประมาณ 100 กิโลกรัมคลุกเคล้าให้เข้ากันแบ่งออกเป็น 4 ส่วน นำตัวอย่าง 2 ส่วนที่กองอยู่ตรงข้ามกันมารวมกันแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำตัวอย่าง 2 ส่วนที่เหลือทิ้งไป ทำเช่นนี้จนกระทั่งเหลือตัวอย่างประมาณ 2 กิโลกรัม นำตัวอย่าง 1 กิโลกรัมมาร่อนผ่านตะแกรงเพื่อหาการกระจายตัวของอนุภาค การสุ่มตัวอย่างด้วยวิธีแบ่งสี่ทำได้ดังรูปที่ 2



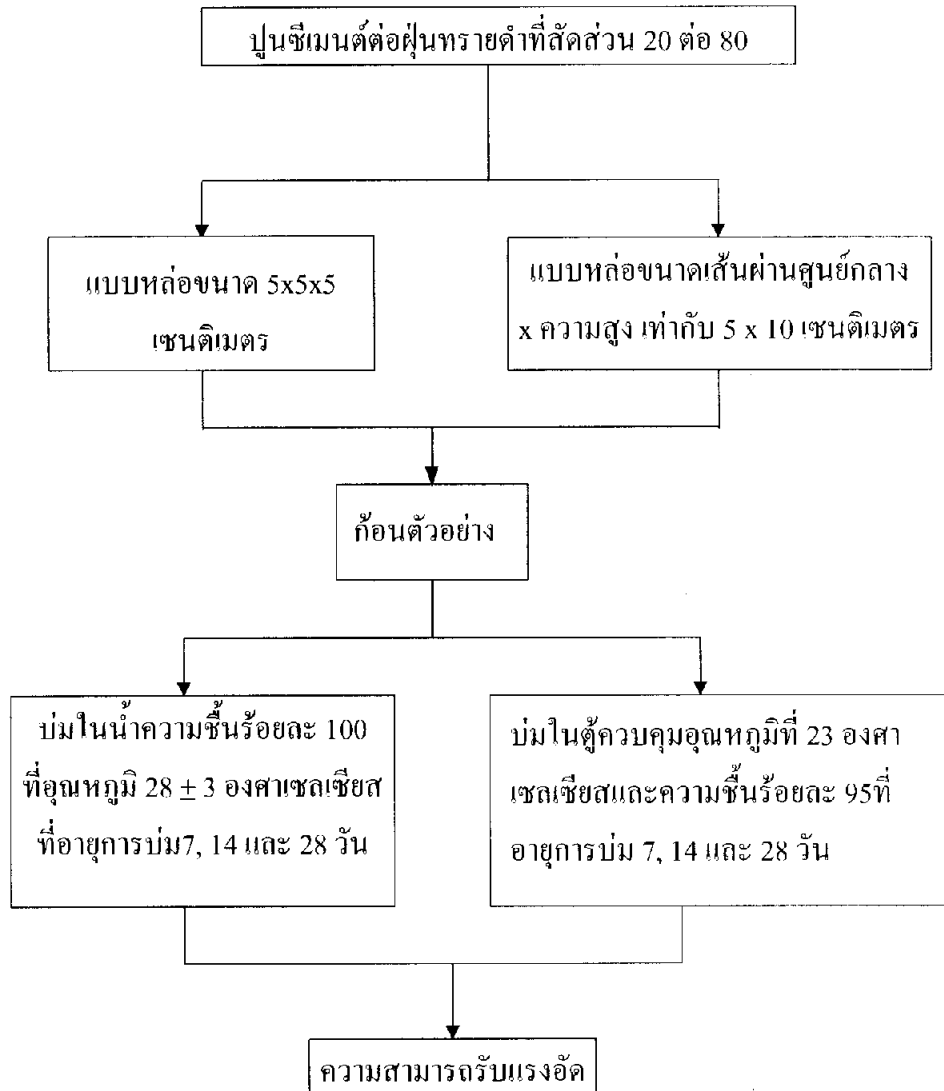
รูปที่ 2 การทำ Quartering

3.2 วัสดุ อุปกรณ์

- 3.2.1 ตะแกรงคัดขนาด (ขนาดเล็กกว่า 9.5 มิลลิเมตร)
- 3.2.2 เครื่องชั่งความละเอียด 0.1 กรัม
- 3.2.3 บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
- 3.2.4 กระจกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร
- 3.2.5 แบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางxความสูงเท่ากับ 5 x 10 เซนติเมตร
- 3.2.6 แบบหล่อรูปลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร
- 3.2.7 เกรียง
- 3.2.8 แท่นทดสอบหาอัตราการไหลแผ่
- 3.2.9 แท่งกระทิง ตามมอก.15 เล่ม 12-2533
- 3.2.10 เครื่องทดสอบความสามารถรับแรงอัด
- 3.2.11 เครื่องผสมปูนซีเมนต์
- 3.2.12 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น
- 3.2.13 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- 3.2.14 ฝุ่นทรายดำ

3.3 วิธีดำเนินการ

วิธีดำเนินการมีขั้นตอนการศึกษาโดยสรุปดังแสดงในรูปที่ 3 แผนภูมิขั้นตอนการศึกษา สำหรับ รายละเอียดในการศึกษามีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 แผนภูมิขั้นตอนการศึกษา

3.3.1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างฝุ่นทรายดำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และสัดส่วนของวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำ

ทำการหล่อก้อนหล่อแข็งเพื่อหาค่าความสามารถรับกำลังอัดได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C109-96^[3] หรือตามมอก.15 เล่ม 12 - 2533^[25]

3.3.2 ศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อการผสมปูนซีเมนต์และฝุ่นทรายดำ

นำปูนซีเมนต์และฝุ่นทรายดำที่สัดส่วนเท่ากับ 20 : 80 ซึ่งน้ำที่ใช้เป็นน้ำประปามาหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยวิธีการวัดค่าการไหล (Flow) ตาม มอก.15 เล่ม 12-2533 โดยให้มีความการไหลอยู่ในช่วง 110 ± 5 เพื่อให้ได้ค่าความสามารถรับกำลังอัดสูงสุดและสามารถทำงานได้โดยสะดวก จากนั้นเมื่อทราบปริมาณน้ำที่เหมาะสมแล้ว จึงนำไปใช้ในการหล่อก้อนตัวอย่าง โดยหล่อในแบบหล่อ 2 รูปทรง คือรูปลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร และรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง \times ความสูงเท่ากับ 5×10 เซนติเมตร

3.3.3 ศึกษาวิธีการบ่มก้อนตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

นำก้อนตัวอย่างทั้งหมดไปบ่ม โดยแยกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกซึ่งประกอบด้วยก้อนตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร จำนวน 15 ก้อนและก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง \times ความสูงเท่ากับ 5×10 เซนติเมตรจำนวน 15 ก้อนนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 28 ± 3 องศาเซลเซียสความชื้นร้อยละ 100 และกลุ่มที่สองจำนวนตัวอย่างเช่นเดียวกับกลุ่มแรกนำไปบ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 23 องศาเซลเซียสและความชื้นร้อยละ 95

3.3.4 ศึกษาหาความสามารถรับกำลังอัด (Compressive strenght)

นำก้อนตัวอย่างจากข้อ 3.3.3 ที่มีช่วงอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับไปทำการวิเคราะห์หาค่าความสามารถรับกำลังอัด

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

ในการศึกษาหาค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกและรูปทรงแปดเหลี่ยมที่ทำกรบ่มในน้ำและบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น พบว่า

- ก้อนหล่อแข็งรูปทรงแปดเหลี่ยมที่บ่มในน้ำให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เฉลี่ยเท่ากับ 83.6, 116.4 และ 152.3 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังปรากฏในตารางที่ 5

- ก้อนหล่อแข็งรูปทรงแปดเหลี่ยมที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เฉลี่ยเท่ากับ 99.7, 139.7 และ 158.5 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังปรากฏในตารางที่ 6

- ก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกที่บ่มในน้ำให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เฉลี่ยเท่ากับ 68.1, 93.4 และ 122.1 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังปรากฏในตารางที่ 5

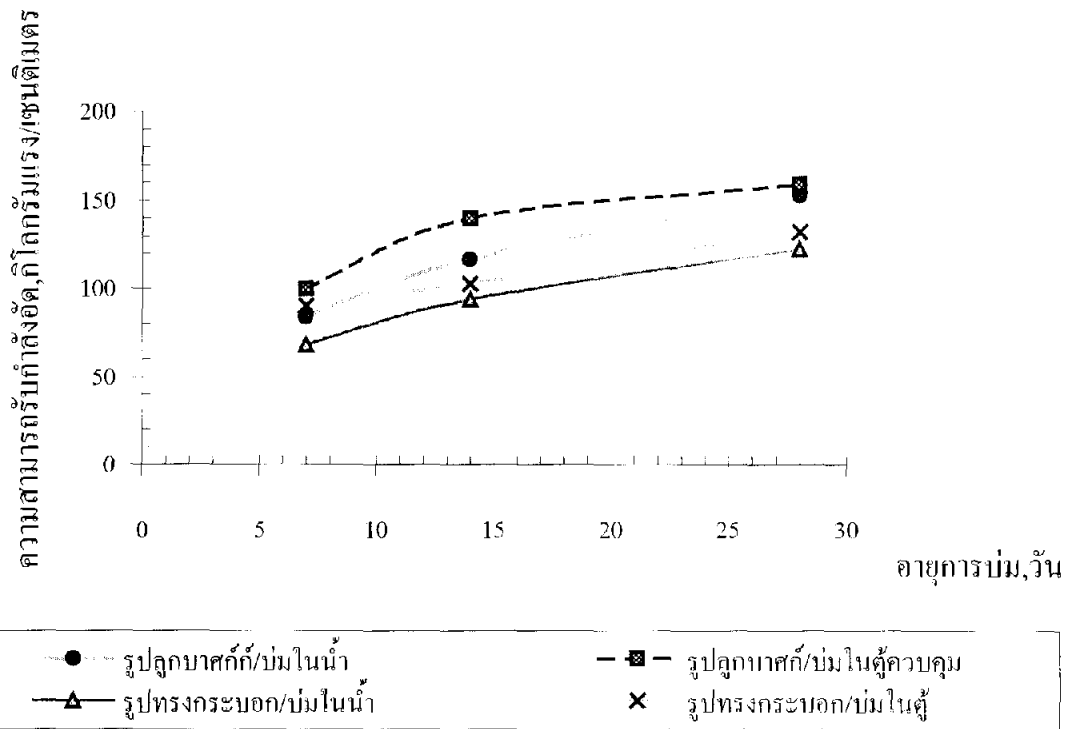
- ก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เฉลี่ยเท่ากับ 90.1, 102.6 และ 132.1 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังปรากฏในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ในสภาวะการบ่มในน้ำ

อายุก้อนหล่อแข็ง, วัน	ก้อนทดสอบ	ความสามารถรับกำลังอัด, กิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตร	
		รูปทรงกระบอก	รูปลูกบาศก์
7	1	66.8	85.0
	2	69.4	82.2
	3	69.8	83.7
	4	69.3	86.0
	5	65.2	81.0
	เฉลี่ย	68.1	83.6
14	1	97.3	116.6
	2	93.7	112.4
	3	89.1	120.1
	4	88.9	114.4
	5	97.9	118.4
	เฉลี่ย	93.4	116.4
28	1	120.7	147.6
	2	123.8	151.5
	3	121.8	157.7
	4	124.2	150.0
	5	120.0	154.6
	เฉลี่ย	122.1	152.3

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ในสภาวะการบ่มโดยการบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

อายุก้อนหล่อแข็ง, วัน	ก้อนทดสอบ	ความสามารถรับกำลังอัด, กิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตร	
		รูปทรงกระบอก	รูปลูกบาศก์
7	1	87.9	99.0
	2	90.1	100.4
	3	99.8	99.2
	4	87.1	100.0
	5	85.7	100.0
	เฉลี่ย	90.1	99.7
14	1	100.9	143.7
	2	102.4	136.8
	3	104.4	138.7
	4	105.3	137.3
	5	99.9	142.1
	เฉลี่ย	102.6	139.7
28	1	135.0	158.9
	2	130.9	156.5
	3	130.4	160.0
	4	133.9	157.4
	5	130.3	159.6
	เฉลี่ย	132.1	158.5



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ที่บ่มในน้ำและบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

บทที่ 5

วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

5.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมก้อนหล่อแข็งเพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำจัดกากตะกอนโลหะหนัก โดยใช้สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อฝุ่นทรายดำ 20 ต่อ 80 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ก้อนหล่อแข็งมีความสามารถรับกำลังอัดได้มากพอที่จะนำไปทำการฝังกลบได้อย่างปลอดภัยตามข้อกำหนดของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดไว้ที่ 14 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ถึงแม้ว่าฝุ่นทรายดำจะมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยาแข็งตัวได้เองเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ แต่ยังคงผสมปูนซีเมนต์ลงไปด้วยในสัดส่วนที่สูงถึงร้อยละ 20 เนื่องจากปฏิกิริยาของฝุ่นทรายดำเกิดขึ้นได้ช้ามากต้องใช้เวลานานจึงจะได้ก้อนหล่อแข็งที่ให้ความสามารถในการรับกำลังอัดได้ตามมาตรฐานการฝังกลบ และเนื่องจากฝุ่นทรายดำมีขนาดอนุภาคใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ถ้านำฝุ่นทรายดำเพียงอย่างเดียวมาทำเป็นก้อนหล่อแข็งจะทำให้ก้อนหล่อแข็งที่ได้มีรูพรุนมากไม่เหมาะสมต่อการนำมากำจัดกากตะกอนโลหะหนักเพราะจะทำให้เกิดการชะละลายของโลหะหนักออกมาได้มาก ดังนั้นการเติมปูนซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่ามาลงไปเพื่อทำให้รูพรุนภายในก้อนหล่อแข็งมีขนาดเล็กลงน้ำจึงซึมผ่านไปได้อย่างยากขึ้นผลคือลดการชะละลายของโลหะหนัก นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดได้อีกด้วย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการหาสัดส่วนของน้ำที่เหมาะสมในการเตรียมก้อนหล่อแข็ง โดยการทดสอบอัตราการไหลเพื่อให้ได้ร้อยละ 110 ± 5 ตาม ASTM C 109 จากการทดลองหาสัดส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อฝุ่นทรายดำ พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมคือ 0.27 : 20 : 80 ซึ่งสัดส่วนของน้ำที่เหมาะสมนี้จะทำให้การผสมและการหล่อแบบเป็นไปด้วยความสะดวก แม้ว่าผลการทดสอบของน้ำลงจะทำให้ความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นแต่ก็ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพราะจะทำให้การทำงานเป็นไปด้วยความยากลำบาก

จากผลการทดลองทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งทั้งที่เป็นรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ พบว่าก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำมีความสามารถในการรับกำลังอัดได้น้อยกว่าก้อนหล่อแข็งที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของสภาพของก้อนหล่อแข็งขณะที่ทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของคอนกรีตทั่วไป กล่าวคือ การทดสอบในสภาพแห้งจะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าในการทดสอบในสภาพเปียกประมาณร้อยละ 20 ถึง 40 แต่ในการทดลองนี้ให้ผลแตกต่างเฉลี่ยประมาณร้อยละ 15 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะในฝุ่นทรายดำมี bentonite ที่มีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำได้ดีผสมอยู่ทำให้ก้อนหล่อแข็งมีความชื้นมาก

กว่าคอนกรีตทั่วไป ส่งผลให้ผลต่างของความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากการทดลองในสภาพเปียกและสภาพแห้งต่างกันน้อยกว่าของคอนกรีตทั่วไป และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ พบว่าก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์ให้ความสามารถรับกำลังอัดสูงกว่าก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกโดยเฉลี่ยร้อยละ 25 ทั้งในสถานะที่บ่มในน้ำและบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าทั้งสภาวะการบ่มและรูปทรงของก้อนหล่อแข็งล้วนมีผลกระทบต่อค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งทั้งสิ้น ซึ่งสามารถอธิบาย โดยสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สภาวะการบ่ม

สาเหตุที่ทำให้ความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำมีค่าน้อยกว่าการบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นนั้นเป็นผลเนื่องมาจาก

1) ในสภาวะการบ่มในน้ำมีการละลายของสารเคมีต่าง ๆ ที่มีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาการแข็งตัวของก้อนหล่อแข็ง ซึ่งสารเคมีเหล่านี้เป็นส่วนผสมที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์และฝุ่นทรายดำ ทำให้การแข็งตัวของก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำเกิดขึ้นได้ช้ากว่าก้อนหล่อแข็งที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่อายุการบ่มเท่ากันก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำจึงให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดน้อยกว่า

2) น้ำมีผลต่อสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยา Hydration ของปูนซีเมนต์ ได้แก่ Calcium silicate hydrate แทนด้วยสัญลักษณ์ C-S-H เนื่องจากน้ำเป็นโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วแรงและมีขนาดเล็กมาก จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) กับผิวของสารประกอบ C-S-H ในก้อนหล่อแข็งได้อย่างดี ในสภาวะที่มีความชื้นน้อยกว่า (บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับ C-S-H จะลดลงและส่งผลให้อนุภาคของ C-S-H เข้าใกล้กันมากขึ้นทำให้ระบบมีความแข็งแรงมากขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงวันเดอร์วาล์ (van der waal's bonding) ที่มีความแข็งแรงมากกว่า Hydrogen bonding ดังนั้นก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำจึงมีความสามารถรับกำลังอัดน้อยกว่าก้อนหล่อแข็งที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

3) การลดลงของพันธะ Si-O-Si ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ความแข็งแรงกับก้อนหล่อแข็งเนื่องจากน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะ Si-O-Si ได้

4) การลดลงของแรงยึดเหนี่ยวทางเชิงกล (Mechanical interlock) เพราะน้ำทำหน้าที่คล้ายกับเป็นตัวหล่อลื่นทำให้การยึดเหนี่ยวทางเชิงกลลดลงส่งผลให้ก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำมีความเปราะมากกว่าก้อนหล่อแข็งที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

จากคำอธิบายข้างต้นจะเห็นว่าน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการหล่อแข็ง หากขาดน้ำก็จะทำให้ก้อนหล่อแข็งแห้งและแตกร้าวได้เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาต่าง

ๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหล่อแข็ง เช่นปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นต้น แต่ถ้ามีน้ำมากเกินไปก็จะทำให้ก้อนหล่อแข็งมีค่าความสามารถรับกำลังอัดลดลง

5.1.2 รูปทรงของก้อนหล่อแข็ง

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์ และก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกพบว่าก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์มีความสามารถรับกำลังอัดสูงกว่าก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกโดยเฉลี่ยร้อยละ 25 ทั้งในสถานะที่บ่มในน้ำและบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งทั้งสองรูปทรงที่แตกต่างกันเกิดจากสาเหตุ 2 ประการคือ ความแตกต่างกันของรูปทรงและความเสียดทานของก้อนหล่อแข็งกับแท่นทดสอบ

ความแตกต่างของรูปทรงมีผลต่อค่าความสามารถรับกำลังอัดสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎี “Weak link” ซึ่งกล่าวว่าความแข็งแรงของก้อนวัสดุถูกกำหนดโดยส่วนประกอบที่อ่อนที่สุดที่เชื่อมกันอยู่ในวัสดุนั้น ถ้าขนาดของก้อนวัสดุใหญ่ขึ้นจะมีส่วนประกอบที่อ่อนที่สุดมากขึ้นส่งผลให้ก้อนวัสดุแตกหักได้ง่ายขึ้นที่แรงกดต่ำลง

ในระหว่างการทดสอบความสามารถรับกำลังอัดนอกเหนือจากจะมีแรงกดตามแนวแกนเดียวกัน (Uniaxial compression) แล้วยังมีแรงที่เกิดจากความเสียดทาน (Friction) ระหว่างปลายของก้อนหล่อแข็งและแท่นเหล็กที่ใช้รองรับทดสอบแรงกด ความเสียดทานนี้เกิดขึ้นจากความแตกต่างของโมดูลัสความยืดหยุ่น และสัดส่วน Poisson's ของเหล็กและก้อนหล่อแข็งเป็นเหตุทำให้แรงเครียดตามขวาง (Lateral strain) ในแท่นเหล็กมีค่าน้อยกว่าการขยายตัวตามขวาง (Lateral expansion) ของปลายของตัวอย่าง ดังนั้นความเสียดทานจึงทำให้แท่นเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดการขยายตัวตามขวางของก้อนตัวอย่าง และทำให้เกิดแรงดันตามขวาง (Lateral confining pressure) ใกล้กับปลายของก้อนหล่อแข็ง โดยที่แรงดันที่เกิดขึ้นมานี้ถ้ามีเหลืออยู่ในก้อนหล่อแข็งมากจะทำให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งมากขึ้นด้วย เพราะแรงดันนี้เป็นแรงที่เสริมแรงด้านแรงกด แรงดันนี้จะมีค่าสูงสุดที่ปลายของก้อนหล่อแข็งและจะค่อยๆ ลดลงจนหมดที่ระยะ $\sqrt{3}/2$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางของตลอดเนื้อก้อนหล่อแข็ง แรงดันนี้เป็นสัดส่วนผกผันกับสัดส่วนระหว่าง l/d (ความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง) ในตัวอย่างก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลองมีสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 แต่ในก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์จะมีสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (ระยะระหว่างด้านที่ขนานกัน) เท่ากับ 1 ดังนั้นในก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกจะมีระยะความสูงมากพอที่จะทำให้แรงดันลดหายไปได้อย่างสมบูรณ์มากกว่าในก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์ที่มีความสูงน้อยกว่า จึงมีแรงดันหลงเหลืออยู่มากและเมื่อรวมกับแรงกดจะทำให้ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดสูงกว่า

5.2 สรุป

5.2.1 ความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งทั้งสองรูปทรงมีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุบ่มนานขึ้น

5.2.2 ความแตกต่างระหว่างรูปทรงของก้อนหล่อแข็งมีผลต่อความสามารถรับกำลังอัด คือก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์มีความสามารถรับกำลังอัดสูงกว่าก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกในทุกช่วงอายุของการบ่ม

5.2.3 ความแตกต่างของวิธีการบ่มก้อนหล่อแข็งมีผลต่อค่าความสามารถในการรับกำลังอัด คือ การบ่มก้อนหล่อแข็งในน้ำจะให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดต่ำกว่าการบ่มก้อนหล่อแข็งในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ทั้งนี้ยังคงเป็นไปตามข้อสรุปที่ 5.1.1 กล่าวคือวิธีการบ่มก้อนหล่อแข็งทั้ง 2 วิธีให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม

5.2.4 จากผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการบ่มอัดกากของเสียอันตรายด้วยเทคนิคการหล่อแข็งโดยใช้ฝุ่นทรายคำผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ที่สัดส่วนฝุ่นทรายคำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 80 ต่อ 20 คือ ก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์ที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เนื่องจากก้อนหล่อแข็งดังกล่าวให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดได้สูงที่สุด

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เนื่องจากการศึกษาทดลองนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำฝุ่นทรายคำที่เป็นกากของเสียจากกระบวนการหลอมโลหะมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการหล่อแข็งสำหรับบำบัดกากของเสียอันตราย ดังนั้นฝุ่นทรายคำนี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และพบว่าไม่เข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตรายเสียก่อนจึงจะสามารถนำมาใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้หากต้องการนำกากของเสียประเภทอื่นมาประยุกต์ใช้ในงานด้านนี้ ต้องทำการวิเคราะห์เสียก่อนว่ากากของเสียเหล่านั้นๆ เข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตรายหรือไม่ ถ้าพบว่าไม่เข้าข่ายและมีคุณสมบัติเป็นวัสดุป่อโซลันจึงจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้

5.3.2 จากบทสรุปข้างต้น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ การใช้รูปทรงก้อนหล่อแข็งเป็นรูปลูกบาศก์และบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยในสภาวะดังกล่าวให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดได้สูงที่สุด แต่ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

กำหนดให้ใช้ก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอก โดยไม่ระบุถึงวิธีการบ่มก้อนหล่อแข็ง ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่ามาตรฐานนี้ต้องการให้ก้อนหล่อแข็งที่ทำการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ ได้ค่าที่น้อยที่สุดและยังอยู่ในเกณฑ์กำหนดเพื่อความปลอดภัย แต่จะเห็นว่าก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกที่บ่มในน้ำให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดที่ต่ำที่สุด แต่สถานะนี้ไม่เหมาะสมอาจเป็นเพราะว่ากากของเสียอันตรายที่อยู่ภายในก้อนหล่อแข็งสามารถรั่วไหลออกมาปนเปื้อนกับน้ำที่ใช้ในการบ่มได้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นภายในก้อนหล่อแข็งยังไม่สมบูรณ์ ในทางปฏิบัติระดับโรงงานกำจัดกากของเสียอันตรายควรทำการหล่อแข็งกากของเสียอันตรายด้วยรูปทรงลูกบาศก์และบ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเพื่อให้ก้อนหล่อแข็งที่มีกากของเสียอันตรายมีอายุการบ่มเพียงพอที่จะให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดสูงที่สุดและได้เกณฑ์มาตรฐานก่อนนำไปฝังกลบ เพื่อป้องกันปัญหาการรั่วไหลของสารอันตรายที่อาจเกิดขึ้นหากมีการแตกตัวของก้อนหล่อแข็งภายหลังจากการฝังกลบแล้ว

5.3.3 ควรทำการทดลองต่อในแง่ของการนำสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปใช้ในการหล่อแข็งกากของเสียอันตรายที่มีปัญหาด้านโลหะหนักเพื่อยืนยันอันตรัยภาพของเทคนิคนี้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการกองฟิสิกส์และวิศวกรรม หัวหน้ากลุ่มงานฟิสิกส์และวิศวกรรม
ทั่วไป 2 หัวหน้ากลุ่มงานสิ่งแวดล้อม กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ เป็นอย่าง
สูงที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำด้านเทคนิคและความรู้ด้านวิชาการต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และ
บรรณารักษ์ กองสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการที่ช่วยเหลือค้นคว้า
เอกสารและข้อมูลที่จำเป็นต่างๆ บริษัท นวโลหะอุตสาหกรรม จำกัด ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างหุ่นทรายดำ
ที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงผู้ร่วมงานที่ให้ความช่วยเหลือด้านงานพิมพ์เอกสารและผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามที่
มีส่วนเกี่ยวข้องในผลงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

1. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540, ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (ฉบับที่ 6), 44 หน้า.
2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2531, ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์ กำจัด ฟัง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (ฉบับที่ 1), 7 หน้า.
3. กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2523, การทำซีเมนต์จากเถ้าแกลบ, รายงานกิจกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ, หน้า 31-64.
4. กฤษณา ผากานนท์, 2537, การกำจัดกากตะกอนนิกเกิลจากกระบวนการชุบโลหะ โดยวิธี Solidification, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข-ค.
5. ไกรทอง ชัยศิริวิเรนทร์, พรพิมล มณีรัตน์, นฤชา เกษมสำราญ, วิจิตร เอมมาโนชญ์ และ สกล แซ่เต๋, 2534, การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้เถ้าแกลบ, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 12-14.
6. จิตรรัตน์ ศรีสุโข, 2540, การกำจัดตะกอนโลหะหนักโดยทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และทราย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล, หน้า ค-ง.
7. ชูชัย เทียวประสงค์, 2539, การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ซีเมนต์ผสมซีเถ้าลอย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข-ค.
8. นฤมิต คินีมาน, 2538, การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีไอดีให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยถิกไนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 1-107.
9. บุรฉัตร นัตร์วีระ และ พิชัย นิมิตยงสกุล, 2537, การประยุกต์ใช้เถ้าแกลบจากกะลามะพร้าว ชั่งข้าวโพคและเปลือกถั่วลิสงผสมในวัสดุซีเมนต์, TDO Quarterly, ปีที่ 3, ฉบับที่ 3, หน้า 20-30.
10. บุรฉัตร นัตร์วีระ และ พิชัย นิมิตยงสกุล, 2538, การผลิตซีเถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาและการประยุกต์ใช้ในบล็อกซีเมนต์ผสมดินแบบอัดแน่น, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปีที่ 3 ฉบับที่ 2, หน้า 6 - 23.
11. ประทีป เกียงเพชร, 2538, การหล่อแข็งกากตะกอนตะกั่วโดยใช้ปูนซีเมนต์ซีเถ้าแกลบและซีเถ้าลอย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข-ค.

12. พยूर เกตุกราย, 2523, การหล่อโลหะ ภาคผลิต, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), หน้า 13-14.
13. วราภรณ์ กิจชัยนุกูล, 2540, การศึกษาสมบัติทรายดำจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมกับปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็ง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข-ค.
14. วิชัย มาชูตระกูล, 2538, การหล่อแข็งภาคตะกอนโครเมียมโดยใช้ปูนซีเมนต์และขี้เถ้าแกลบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 9-12.
15. วินิต ช่อวิเชียร, 2529, คอนกรีตเทคโนโลยี, พิมพ์ครั้งที่ 7, โรงพิมพ์ป.สัมพันธ์พาณิชย์, หน้า 20-23.
16. สมชัย กกกำแหง, 2536, การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในงานก่อสร้างของ กฟผ., วารสาร กฟผ., ปีที่ 2 ฉบับที่ 2, หน้า 3-21.
17. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532, มอก15-2532: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
18. สุนี ปิยะพันธุ์พงศ์, 2535, เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรระยะ (การวิเคราะห์), ศูนย์วิจัยแลฝีกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม, หน้า (3-1)–(3-2).
19. หริส สุตะบุตร และ เคนยิ จิยิอิวา, 2517, หล่อโลหะ, สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ, หน้า 1-2.
20. อรุณ ชัยเสรี, 1967, คู่มือการตรวจสอบคอนกรีตของสมาคมคอนกรีตอเมริกัน, พิมพ์ครั้งที่ 5, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 60-61.
21. American Society for Testing and Materials, 1991, ASTM C219-91 : Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement, In 1991 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 166-167.
22. American Society for Testing and Materials, 1991, ASTM C618-91 : Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, In 1991 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, p. 5.
23. American Society for Testing and Materials, 1996, ASTM C109 – 96 : Standard Method of Testing for Compressive Strength of Hydraulic Cement, In 1996 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 59-63.
24. Chang, C.L., 1989, Solidification of Heavy Metals using Cement and Rice Husk Ash, Master Thesis of Engineering, Environmental Engineering Programme, Asian Institute

of Technology, pp. 2-3

25. Environmental Protection Agency, 1986, 40 CFR Parts 261, 271, and 302 : Hazardous waste Management System; Identification and Listing of Hazardous' Waste; Notification Requirement; Reportable Quantity Adjustment; Proposed Rule, Federal Register, Vol. 51, No. 114, pp. 21648-21693.
26. Jaggi, N., 1988, Solidification of Hazardous Waste using Cementitious Binders, Master Thesis of Engineering, Environmental Engineering Programme, Asian Institute of Technology, pp. 2-5
27. Leangoon, K., 1993, Solidification of Hazardous Waste by Cement - based Techniques, Master Thesis of Engineering, Environmental Engineering Programme, Asian Institute of Technology, pp. 2-3
28. Mindiss, Sidney and Young, J. Francis, Concrete. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1981, p410 – 424.
29. Srivastava, A.K., 1989, Solidification of Hazardous Waste from Pesticide Industries by Using Cementitious Binders, Master Thesis of Engineering, Environmental Engineering Programme, Asian Institute of Technology, p. 96.