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

วศ
กฟ
อว 4

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 6 ว

ของ

นายอนนท์ ป้อมประสิทธิ์
นักวิทยาศาสตร์ 5

เรื่องที่ 2

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งโดยใช้ฝุ่นทรายดำ

ผู้ดำเนินการ

1.นางสาววราภรณ์ กิจชัยนุกูล นักวิทยาศาสตร์ 6 ว
กลุ่มงานสิ่งแวดล้อม
2.นายอนนท์ ป้อมประสิทธิ์ นักวิทยาศาสตร์ 5
กลุ่มงานฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป 2

กองฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 6 ว

ของ

เลขหมู่ ๑๑๑
๐๑ A
เลขทะเบียน 9899
วันที่ 11 เม.ย. 44

นายอนนท์ ป้อมประสิทธิ์
นักวิทยาศาสตร์ 5

เรื่องที่ 2

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งโดยใช้ฝุ่นทรายดำ

ด้วยอภินันทนาการ
จาก
กฟ.

ผู้ดำเนินการ

1.นางสาววราภรณ์ กิจชัยนุกูล นักวิทยาศาสตร์ 6 ว
กลุ่มงานสิ่งแวดล้อม

2.นายอนนท์ ป้อมประสิทธิ์ นักวิทยาศาสตร์ 5
กลุ่มงานฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป 2

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 ในขณะที่มาตรฐานการฝังกลบของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร

ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาเป็นการนำกากของเสียมาใช้ประโยชน์ทั้งยังใช้เป็นแนวทางในการบำบัดกากของเสียอันตรายด้วยเทคนิคการทำเป็นก้อนด้วยสารประสาน

สารบัญ

		หน้า
	บทคัดย่อ	ก
บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	ทฤษฎี	11
บทที่ 3	วัสดุอุปกรณ์เครื่องมือและวิธีดำเนินการ	24
บทที่ 4	ผลการทดลอง	28
บทที่ 5	วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง	32
	เอกสารอ้างอิง	37
	กิตติกรรมประกาศ	40

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	สัดส่วนของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ (Portland cement)	13
ตารางที่ 2	สารประกอบที่มีอยู่ในซีเมนต์หลังการเผา	13
ตารางที่ 3	ข้อกำหนดสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และข้อกำหนดเสริมของวัสดุปอซโซลานประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C 618-91	16
ตารางที่ 4	ค่ามาตรฐานของโลหะหนักในน้ำสกัด	19
ตารางที่ 5	เปรียบเทียบค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ในสภาวะการบ่มในน้ำ	29
ตารางที่ 6	เปรียบเทียบค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ในสภาวะการบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น	30

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1	แผนภาพแสดงรายละเอียดการเกิดกากของเสียในส่วนของการเตรียมแบบหล่อทราย	23
รูปที่ 2	การทำ Quartering	25
รูปที่ 3	แผนภูมิขั้นตอนการศึกษา	26
รูปที่ 4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ที่บ่มในน้ำและบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	31

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยในปัจจุบันกำลังเผชิญกับปัญหากากของเสียที่นับวันจะเป็นปัญหาที่รุนแรงมากขึ้นทุกขณะ แม้ว่าจะมีหน่วยงานของรัฐหลาย ๆ หน่วยงานที่ให้ความสำคัญกับปัญหานี้ เช่น กรมควบคุมมลพิษ กรมโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น กากของเสียทุกชนิดไม่จำเป็นว่าจะต้องเป็นกากของเสียอันตรายเสมอไป การจำแนกประเภทของกากของเสียนั้นจำเป็นต้องนำกากของเสียนั้น ๆ มาทำการวิเคราะห์เพื่อแยกประเภทเสียก่อน ทั้งนี้เพื่อหาวิธีการจัดการที่เหมาะสมต่อไป

สำหรับประเทศไทยการวิเคราะห์เพื่อจำแนกประเภทกากของเสียนั้น จะยึดตามเกณฑ์ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) [10] ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งในประกาศฉบับนี้จะกล่าวถึงหลักใหญ่ของวิธีการวิเคราะห์รวมถึงวิธีการบำบัดกากของเสียที่เข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตราย (Hazardous Waste) ด้วย จากการวิเคราะห์กากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ของกลุ่มงานสิ่งแวดล้อม กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ พบว่ามากกว่าร้อยละ 60 ของตัวอย่างกากของเสียที่ขอรับบริการจากกลุ่มงานสิ่งแวดล้อมเป็นกากของเสียทั่วไป (Non-hazardous Waste)ไม่เข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตราย นอกจากนี้ยังพบว่ากากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ทั้งนี้การเลือกแนวทางการนำกากของเสียไปใช้ประโยชน์ในด้านใดนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของกากของเสียนั้น ๆ แต่โดยทั่วไปแล้วกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกิดจากกระบวนเผาไหม้หรืออื่น ๆ ที่มีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานมักนำมาใช้เป็นวัสดุผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านงานหล่อแข็งและด้านงานก่อสร้าง ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของงานแต่ละด้านเพื่อให้มีสมบัติได้ตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนดในกิจกรรมแต่ละประเภท รวมถึงศักยภาพในด้านอื่น ๆ ประกอบด้วย

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของการนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะมาใช้ประโยชน์ด้านการหล่อแข็ง ซึ่งกากของเสียที่นำมาศึกษาครั้งนี้คือฝุ่นทรายดำที่เป็นกากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมแบบหล่อที่ทำจากทราย โดยที่

ฝุ่นทรายดำนี้เก็บมาจากส่วนของระบบบำบัดอากาศเสียแบบถุงกรอง (Baghouse Filter) ซึ่งทางโรงงานนำไปทิ้งไว้โดยเปล่าประโยชน์

ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับดังกล่าวข้างต้นได้ระบุถึงการลดพิษและประเภทของการบำบัดกากของเสียด้วยวิธีการหล่อแข็งโดยอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASTM ซึ่งเป็นไปมาตรฐานที่ใช้ในงานก่อสร้างแต่ในบางครั้งวิธีการนี้ไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการบำบัดกากของเสียบางประเภท ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ รูปทรงของแบบหล่อและวิธีการบ่มชื้น ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความสามารถรับกำลังอัด (Compressive strength) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบำบัดกากของเสียด้วยวิธีการหล่อแข็งต่อไป

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบของรูปทรงและวิธีการบ่มชื้นที่มีต่อค่าความสามารถรับกำลังอัด ทั้งนี้เนื่องจากในประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2531) [9] ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 เรื่องกำหนดวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์ กำจัด ฝัง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นกฎหมายที่ใช้บังคับก่อนเดือนพฤศจิกายนปีพ.ศ. 2540 นั้น มิได้มีการระบุถึงวิธีดำเนินการของการหล่อแข็ง ดังนั้นผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาด้านการหล่อแข็งในประเทศไทยจึงดำเนินการตามมาตรฐานของงานก่อสร้าง โดยรูปทรงที่ใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร และบ่มชื้นด้วยวิธีบ่มในน้ำ 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 solidfication) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุปอซโซลานมีผู้นิยมทำการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก วัสดุปอซโซลานที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ ได้แก่ เถ้าลอยลิกไนต์ได้จากโรงงานไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง เถ้าแกลบ เถ้าจากการเผาขยะชุมชน นอกจากนี้ยังมีฝุ่นที่เก็บจากระบบกำจัดแบบถุงกรองในอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะจากกระบวนการเตรียมแบบหล่อที่ทำด้วยทราย ผลงานวิจัย

ต่างๆ เหล่านั้นจึงทำขึ้นภายในสภาวะบ่มในน้ำและใช้ก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์ ผลงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

Jaggi [6] ศึกษากระบวนการหล่อแข็งโดยใช้ซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบและผงซีเมนต์จากเตาที่โรงงานปูนซีเมนต์เพื่อกำจัดสารอันตรายจากโรงงานชุบโลหะ อุตสาหกรรมแบตเตอรี่และอุตสาหกรรมกำจัดศัตรูพืช สารอันตรายที่ทำการหล่อแข็ง คือ แคดเมียม, ตะกั่ว และอัลดริน จากของเสียที่ปนเปื้อนจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การชะละลายของโลหะหนักและอัลดริน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเสียในอัตราส่วนผสมและเพิ่มอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาณของแท่งซีเมนต์และการชะละลายมีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม pH ของสารสกัด การทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณของเสียและระยะเวลาบ่มนานขึ้น อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อแข็ง ของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์ (แคดเมียมและตะกั่ว) และอัตราส่วนผสมที่ 0.35 เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ (อัลดริน) เมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้ทำเป็นก้อน 3 ชนิด พบว่า ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบเหมาะสมสำหรับกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะและแบตเตอรี ปูนซีเมนต์เหมาะสมกับของเสียที่มีแคดเมียมและผงซีเมนต์จากเตาเผาเหมาะกับของเสียที่เป็นยาฆ่าแมลง

Srivastava [8] ศึกษาเรื่องการหล่อแข็งกากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตยาฆ่าแมลง โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นตัวยึดประสานเพื่อหาวิธีการลดการเคลื่อนที่ของกากของเสียจาก อุตสาหกรรมผลิตยาฆ่าแมลง สารฆ่าแมลงที่ทำการศึกษาได้แก่ Organo-chlorines , Organo-phosphates และ Atrizines ตัวยึดประสานที่ใช้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบอัตราส่วนผสมเท่ากับ 1 ต่อ 1 ในการศึกษาการหล่อแข็งเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมทรายในอัตราส่วน 1 : 2 อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สำหรับการหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบเท่ากับ 0.65 ศึกษาสมบัติของก้อนหล่อแข็งโดยหาค่าความสามารถรับกำลังอัดและค่าการรั่วซึม ผลการศึกษาพบว่า ค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมทรายมีค่าสูงกว่าก้อนหล่อแข็งที่ได้จากปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ ในขณะที่ค่าการรั่วซึมของก้อนหล่อแข็งจากปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบมีค่าต่ำกว่าก้อนหล่อแข็งจากปูนซีเมนต์ผสมทราย นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดสอบค่าการรั่วซึมของกากตะกอนที่ไม่ได้ทำการหล่อแข็งมีค่าต่ำกว่าค่าการรั่วซึมของก้อนหล่อแข็ง จากผลการทดสอบนี้สรุปได้ว่าการใช้ปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็งไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำการหล่อแข็งกับกากตะกอนของสารฆ่าแมลงเนื่องจากในสภาวะที่เป็นด่างจะส่งเสริมให้มีการรั่วไหลของสารอินทรีย์มากขึ้น

Chang [4] วิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการหล่อแข็ง โดยใช้ซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบเปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักระหว่างการใช้ซีเมนต์อย่างเดียวกับซีเมนต์ผสมขี้เถ้า

แกลบด้วยอัตราส่วน 1 : 1 โดยใช้โลหะหนักสังเคราะห์ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง และปรอท ผลการวิจัยสรุปว่า กลไกการยึดเกาะโลหะหนักในซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมการชะละลาย พันธะการยึดเกาะที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการชะละลายโลหะหนัก การชะละลายของโครเมียมในซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบสูงกว่าในซีเมนต์อย่างเดียว ในขณะที่การชะละลายของทองแดงและปรอท ในซีเมนต์อย่างเดียวสูงกว่าซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ ทองแดงและปรอทถูกยึดอยู่ในซีเมนต์ในรูพรุนหรือดูดติดกับผนังของรูพรุน การชะละลายทองแดงและปรอทขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่าง ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดพบว่าค่าความเป็นด่างมีค่าสูงขึ้นตามค่าการชะละลายของทองแดงและปรอท การวิจัยนี้สรุปว่าวิธีการหล่อแข็งโดยใช้ซีเมนต์อย่างเดียว เหมาะสมกับการกำจัดโครเมียมและการใช้ซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบเหมาะสำหรับกำจัดทองแดงและปรอท

รายงานกิจกรรมวิทยาศาสตร์บริการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน ปี 2523 [11] ทำการศึกษาเรื่องการทำซีเมนต์จากเถ้าแกลบ โดยทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบ พบว่าที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าแกลบที่ 5 : 1 ทำให้ก้อนหล่อแข็งทนแรงกดได้ดีที่สุด หลังจากได้อัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วได้ทำการทดลองต่อไปเพื่อทดลองทำเป็นคอนกรีต พบว่าที่อัตราส่วนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบต่อทรายต่อหินเท่ากับ 1: 2 : 4 และใช้น้ำ 0.6 เท่าของซีเมนต์ผสมจะให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดที่สูงที่สุด ขั้นตอนสุดท้ายทำการทดลองนำเถ้าแกลบมาผสมกับซีเมนต์มาทดสอบการใช้งานพบว่าที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 70 : 30 มีความเป็นไปได้ในการผลิตซีเมนต์จากเถ้าแกลบ

Leangoon[7] วิจัยเรื่องการหล่อแข็งกากของเสียอันตรายด้วย Cement-based techniques เพื่อหาตัวยึดประสานที่เหมาะสมในการหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงงานฟอกหนังและโรงงานสารกึ่งตัวนำ กากตะกอนจากโรงงานฟอกหนังประกอบด้วยโครเมียมและสารอินทรีย์ ในขณะที่กากตะกอนของโรงงานผลิตสารกึ่งตัวนำประกอบด้วย ทองแดง ตะกั่วและสังกะสี ตัวยึดประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้าลอยและซิลิกาฟูม เปรียบเทียบค่าความสามารถรับกำลังอัด, การรั่วซึมและค่าใช้จ่ายของก้อนหล่อแข็งด้วยตัวยึดประสานต่าง ๆ ผลการศึกษาสรุปว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของตัวยึดประสาน (Combination of cementitious meterials, CCM) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อขี้เถ้าแกลบต่อขี้เถ้าลอย เท่ากับ 0.7 : 0.2 : 0.1 และอัตราส่วนของกากตะกอนต่อ CCM เท่ากับ 0.64 เหมาะสมสำหรับกากตะกอนจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง และอัตราส่วนของ CCM ที่เหมาะสมในการหล่อแข็งกากตะกอนจากอุตสาหกรรมผลิตสารกึ่งตัวนำ คือ ปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าแกลบต่อขี้เถ้าลอยเท่ากับ 0.7 : 0.1 : 0.2 และอัตราส่วนของกากตะกอนต่อ CCM เท่ากับ 1.37 จากผลสรุปดังกล่าวจะเห็นว่าขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอยมีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ในการหล่อแข็ง

สมชัย กกกำแหง [24] ทดลองนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ในงานก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต โดยใช้เป็นชั้นรองพื้นทางรองรับถนนตลอดจนทำเป็นฐานรากแผ่นรองรับลานจอดยานพาหนะขนาดใหญ่และลานกองพัสดุในบริเวณแม่เมาะ ได้มีการตรวจติดตามคุณภาพของเถ้าลอยฯ แข็งตัวเหล่านั้นพบว่าเถ้าลอยฯ ยังคงรักษาความแข็งแรงในเวลา 3 ปี ได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นผลการทดสอบสารปนเปื้อนจำพวกโลหะหนักที่ปะปนแข็งตัวซึ่งเจาะเก็บมาจากตำแหน่งต่าง ๆ ที่นำเถ้าลอยฯ เหล่านั้นไปใช้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสิ้น

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิมิตยงสกุล [17] ศึกษาการประยุกต์ใช้ขี้เถ้าจากกะลามะพร้าว ซังข้าวโพดและเปลือกถั่วลิสง ผสมในวัสดุซีเมนต์เพื่อพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่สามารถนำมาผสมกับซีเมนต์นอกเหนือจากขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าจากฟางข้าว ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาสมบัติของเพสท์และมอร์ตาร์ที่มีขี้เถ้าดังกล่าวผสมแบบแทนที่ซีเมนต์ สมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ, ค่าความละเอียด, ส่วนประกอบทางเคมีและดัชนีกำลังเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์สมบัติของเพสท์ที่ทำการศึกษา คือ ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาสุดท้ายของซีเมนต์ผสมขี้เถ้าจากเปลือกถั่วลิสงในอัตราส่วน 70 : 30 และศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมขี้เถ้าจากกะลามะพร้าว ขี้เถ้าจากซังข้าวโพดและขี้เถ้าจากเปลือกถั่วลิสง ที่อัตราส่วนผสม ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ผสมซีเมนต์และความสามารถทนต่อสภาพกรดซัลฟุริกและกรดไฮโดรคลอริกของมอร์ตาร์ผสมขี้เถ้าดังกล่าวเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ผลการทดสอบปรากฏว่ากะลามะพร้าวไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำวัสดุซีเมนต์ได้ ยกเว้นขี้เถ้าจากซังข้าวโพดและเปลือกถั่วลิสง มอร์ตาร์ผสมขี้เถ้าจากซังข้าวโพดจะให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมขี้เถ้าจากเปลือกถั่วลิสงให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา ในการทดสอบผลของกรดที่มีต่อมอร์ตาร์ พบว่า มอร์ตาร์ที่ผสมขี้เถ้าจากเปลือกถั่วลิสงสามารถทนต่อสภาพกรดได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมขี้เถ้าแกลบ

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิมิตยงสกุล [18] ทำการวิจัยเพื่อหาตัวแปรที่จำเป็นสำหรับผลิตขี้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา ตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมขี้เถ้า คือ เวลาการเผา อุณหภูมิการเผา สภาพอากาศระหว่างการเผา อัตราการปล่อยให้เย็นตัวลงและเวลาการบด ขี้เถ้าแกลบถูกผสมกับปูนขาวโดยสัดส่วนขี้เถ้าแกลบต่อปูนขาวมีค่าเท่ากับ 30 : 70 ผลของตัวแปรของขี้เถ้าแกลบประเมินจากขีดความสามารถในการเพิ่มกำลังของมอร์ตาร์ที่ผสมขี้เถ้าแกลบและปูนขาว วิธีการประยุกต์ใช้ขี้เถ้าดังกล่าวกับปูนขาวในบล็อกซีเมนต์ผสมดินแบบอัดแน่นถูกพบเป็นครั้งแรก ข้อสรุปที่ได้จากการวิจัยนี้ คือ ขี้เถ้าแกลบจะมีความไวต่อการทำปฏิกิริยามากหรือน้อย ขึ้นกับ (1) สภาพอากาศระหว่างการเผาและอัตราปล่อยให้เย็นตัวลงรวมทั้งอุณหภูมิการเผา เวลาการเผาและการบด (2) สภาพอนุภาคของขี้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยามีลักษณะเฉพาะเมื่อใช้กล้องขยาย

ส่องดู (3) ขี้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาสามารถนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ราคาถูกและมีประโยชน์มากเมื่อใช้ร่วมกับปูนขาวในการแทนที่ในซีเมนต์เพื่อผลิตบล็อกซีเมนต์ผสมดิน

นฤมิต กินิมาน[6] ศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ในการทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีให้เป็นก้อน ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและทดสอบสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน ได้แก่กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และ ค่าการซึมผ่านน้ำ นอกจากนี้ยังทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก คือ ปรอท โครเมียม และเหล็ก รวมทั้งทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนและประมาณค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน ผลการศึกษาสรุปได้ว่า เถ้าลอยลิกไนต์มีสมบัติเหมาะสมในการทำให้เป็นก้อน อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าลอยที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 50 อัตราส่วนผสมระหว่างตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 และอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 0.5 วัสดุประสานชนิดนี้สามารถใช้ได้ดีกับโครเมียมเพราะให้ค่าการชะละลายอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแต่ไม่สามารถใช้ได้กับเมอร์คิวรีเนื่องจากค่าการชะละลายของเมอร์คิวรีจากก้อนหล่อแข็งเกินมาตรฐาน ค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยวิธีนี้มีค่า 3600 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนักแห้ง

กฤษณา ผากานนท์ [12] ทำการศึกษาการกำจัดตะกอนนิกเกิลจากกระบวนการชุบโลหะโดยวิธี 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 จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคปรากฏว่าปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยลิกไนต์มีโครงสร้างอัดตัวกันแน่กว่าปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ นอกจากนี้ในประเทศไทยมีปริมาณขี้เถ้าลอยลิกไนต์จำนวนมากและมีความสม่ำเสมอจึงเลือกขี้เถ้าลอยลิกไนต์มาทำการทดลองเพื่อหาศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ พบว่า ขี้เถ้าลอยลิกไนต์มีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ในการ

กำจัดนิกเกิล ที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 35 และปริมาณตะกอนร้อยละ 15

วิชัย มาชูตระกูล [22] ศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ปูนซีเมนต์และขี้เถ้าแกลบ ในการศึกษาทดลองใช้โครเมียมสังเคราะห์เพื่อหาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ (CRHA)ต่อปริมาณตะกอนที่เหมาะสม โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าแกลบเท่ากับ1 : 1 และน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 : 1 อัตราส่วนปริมาณตะกอนที่ทำการทดลองคือ 2, 5, 10, 20, 50, 75 และ 100 gCr/kgCRHA ทำการทดสอบการรั่วไหลด้วยวิธีมาตรฐาน(Extraction Procedure Toxicity, EPTox) ภายใต้สภาวะการรั่วไหลในสารละลายกรดอะซิติก น้ำทะเลสังเคราะห์ สารละลายซัลเฟตเข้มข้น 60 ppm. สารละลายไบคาร์บอเนตเข้มข้น 400 ppm. และน้ำปราศจากอิออน และศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค ผลการทดลองสรุปว่าที่อัตราส่วน 50 gCr/kgCRHA เป็นปริมาณสูงสุดที่มีค่าการรั่วซึมต่ำกว่ามาตรฐาน แต่ที่อัตราส่วน 10 gCr/kgCRHA ให้ค่าความต้านทานกำลังอัดสูงสุด การรั่วซึมของโครเมียมมีค่าสูงสุดภายใต้สภาวะที่เป็นกรดอะซิติกเนื่องจากกรดไปทำลายโครงสร้างของซีเมนต์ รองลงมาคือน้ำทะเลสังเคราะห์เพราะซัลเฟตทำให้เกิดการบวม สำหรับสภาวะอื่น ๆ มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันแต่ต่ำกว่า 2 สภาวะข้างต้น

ประทีป เลียงเพ็ชร [18] ศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนตะกั่วโดยใช้ปูนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอย ซึ่งศึกษาทดลองโดยใช้ตัวยึดประสาน 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ซิลิกา ขี้เถ้าแกลบ และขี้เถ้าลอย วิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงอัด การรั่วซึมด้วยวิธี EPTox การรั่วซึมตามสภาพการใช้งานและศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค เพื่อหาชนิดและอัตราส่วนของตัวยึดประสานที่เหมาะสมในการตรึงกากตะกอนตะกั่ว การทดลองแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ทำการตรึงตะกั่ว 1 กรัมต่อตัวยึดประสาน 1 กิโลกรัมและทราย 2 กิโลกรัม ซึ่งแบ่งตัวยึดประสานออกเป็น 7 ชุด คือ ปูนซีเมนต์ซิลิกา 100 % ปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมขี้เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมขี้เถ้าลอย โดยมีปริมาณขี้เถ้า 30% 50% และ 70% ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำเท่ากับ 0.55 0.65 และ 0.4 ตามชนิดของตัวประสานตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมขี้เถ้าลอย 70% เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการตรึงกากตะกอนตะกั่ว เนื่องจากให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดและค่าการรั่วซึมของตะกั่วอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับการทดลองในชุดที่ 2 ใช้ผลการทดลองในชุดแรกมาทำการศึกษาหาปริมาณตะกั่วในกากตะกอนที่สูงที่สุดที่ทำให้ก้อนหล่อแข็งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ความเข้มข้นของตะกั่วที่ทำการศึกษา คือ 0, 3, 5, 7, 10, 15, 25 และ 40 กรัม โดยใช้ปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมขี้เถ้าลอย 70% 1 กิโลกรัม ทราย 2 กิโลกรัม และอัตราส่วนน้ำต่อตัวยึดประสานเท่ากับ 0.4 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณตะกั่ว 15 กรัมเป็นความเข้มข้นสูงที่สุดที่ทำให้ก้อนหล่อแข็งมีค่าความสามารถในการรับกำลังอัดและค่าการรั่วซึมของตะกั่วจากวิธีทดสอบทั้ง 2 วิธีอยู่ใน

เกณฑ์มาตรฐาน จากการวิจัยนี้สรุปว่าขี้เถ้าลอยมีศักยภาพในการใช้แทนปูนซีเมนต์ซิลิกาได้ 70 % และตรึงตะกั่วได้ 15 กรัม

ชูชัย เที่ยวาประสงค์ [13] ศึกษาเรื่องการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ซีเมนต์ผสม ขี้เถ้าลอย 35 % เพื่อหาปริมาณโครเมียมสูงสุดที่เมื่อทำการหล่อแข็งแล้วสามารถนำไปฝังกลบได้อย่างปลอดภัย ขั้นตอนในการทดลองจะทำการศึกษาจากชุดการทดลอง 2 ชุด ชุดแรกศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมชุบผิวโลหะ โครเมียมจำนวน 5 แห่ง ทำการตรวจสอบความสามารถรับกำลังอัดและการรั่วซึมของโครเมียมจากก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการบ่มชื้นภายใน 28 วัน ในการศึกษาทดลองชุดที่ 1 สรุปว่า ก้อนหล่อแข็งสามารถรับปริมาณโครเมียมสูงสุดเท่ากับ 40 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของตัวยึดประสาน จะให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดและปริมาณการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับผลการศึกษาทดลองในชุดที่ 2 ซึ่งใช้ปริมาณโครเมียมในกากตะกอนเท่ากับ 40 กรัมต่อกิโลกรัมของตัวยึดประสานที่ได้จากผลการทดลองในชุดที่ 1 พบว่าก้อนหล่อแข็งที่มีค่าความสามารถรับกำลังอัดและค่าการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานมาจากโรงงานอุตสาหกรรม 4 แห่ง ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของโครเมียมในกากตะกอนเท่ากับ 69.70, 1011.35, 106.40 และ 147.02 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับโรงงานที่มีความเข้มข้นของโครเมียมในกากตะกอนแห้งเท่ากับ 258.11 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าความสามารถในการรับแรงอัดเท่ากับ 21.14 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานแต่มีค่าการรั่วซึมของปริมาณโครเมียมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำใช้ชุมชนคือ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร

จิตรัตน์ ศรีสุโข [14] ศึกษาการกำจัดตะกอนโลหะหนักโดยทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และทราย โดยทำการหล่อแข็งกากตะกอนของโรงงานชุบโลหะหนัก ชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ นิกเกิล และโครเมียม ปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ สัดส่วนที่เหมาะสมของโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอน ซึ่งใช้ค่าความสามารถรับกำลังอัด การชะละลายของโลหะหนักตามมาตรฐานการทดสอบความเป็นพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และการหาปริมาณโลหะหนักที่ละลายออกมาจากก้อนคอนกรีตแช่น้ำที่พีเอชเท่ากับ 4.5 และ 5.8 ตามคุณลักษณะของน้ำฝนเป็นเวลา 5 ถึง 10 วัน เป็นดัชนีบ่งชี้ ผลการศึกษาพบว่าค่าความสามารถรับกำลังอัดลดลงตามอัตราส่วนของกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต สัดส่วนที่เหมาะสมของปูนต่อกากตะกอนต่อทราย คือ 1.5 : 1.0 : 2.5 โดยน้ำหนัก สำหรับการหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และการศึกษาปริมาณโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดที่ละลายออกมาจากก้อนคอนกรีตแช่น้ำที่พีเอช 4.5 และ 5.8 ให้ผลไม่แตกต่างกัน ระยะเวลาในการแช่มีผลต่อการละลายออกมาของโครเมียมแต่ไม่มีผลต่อการละลายออกมาของนิกเกิล

วราภรณ์ กิจชัยนุกูล [21] ทำการวิจัยเรื่อง การศึกษาสมบัติทรายดำจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมกับปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็ง โดยทำการศึกษาถึงสมบัติของฝุ่นทรายดำซึ่งเป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะ พบว่าฝุ่นทรายดำจัดเป็นกากของเสียทั่วไปไม่เข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตรายและมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็งได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำฝุ่นทรายดำนี้ไปผสมกับปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนฝุ่นทรายดำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 80 : 20 ตรึงปรอทที่ได้จากการตกตะกอนน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ซีโอดีในรูปของปรอทซัลไฟด์ โดยปรอทที่สามารถตรึงได้สูงสุดในการทดลองนี้อยู่ที่ 25.29 ไมโครกรัม

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งโดยใช้ฝุ่นทรายดำ โดยวิธี pozzolanic and cement based solidfication technique

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งด้วยฝุ่นทรายดำ โดยวิธี pozzolanic and cement based solidfication technique

1.4.2 ศึกษาผลของรูปทรงของก้อนหล่อแข็งที่มีต่อค่าความสามารถรับกำลังอัด โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์ขนาด 5 x5 x5 เซนติเมตร กับก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความสูงเท่ากับ 5 x 10 เซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

1.4.3 ศึกษาผลของวิธีการบ่มก้อนหล่อแข็งที่มีต่อค่าความสามารถรับกำลังอัด โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการบ่มในน้ำกับวิธีการบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 23 ^{o}C และความชื้นที่ร้อยละ 95 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการกำหนดมาตรฐานวิธีการกำจัดกากของเสียด้วยวิธีหล่อแข็งโดยใช้ Pozzolanic and cement based solidfication technique

1.5.2 เป็นแนวทางในการนำกากของเสียที่ไม่เป็นอันตรายกลับมาใช้ประโยชน์ (Utilization) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการลดปริมาณของเสีย (Waste minimization)

1.5.3 เป็นการส่งเสริมให้ภาคอุตสาหกรรมดำเนินการตามมาตรฐาน ISO 14000 ในเรื่องการจัดการกากของเสีย อันจะยังผลให้สินค้าที่ผลิตขึ้นภายในประเทศสามารถส่งออกไปยังต่างประเทศได้โดยปราศจากข้อขัดแย้ง

บทที่ 2
ทฤษฎี

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ การหล่อแข็ง กากของเสียและแหล่งกำเนิดของกากของเสียในกระบวนหล่อหลอมโลหะที่นำมาใช้ในการศึกษา ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังต่อไปนี้

2.1 การหล่อแข็ง

2.1.1 เทคนิคการหล่อแข็ง

การหล่อแข็งไม่ใช่วิธีการกำจัดของเสีย แต่เป็นการเปลี่ยนรูปของเสียให้คงทนต่อสภาวะแวดล้อมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์หรือลดความเป็นพิษลง การหล่อแข็งเป็นกระบวนการที่ใช้ก่อนการกำจัดขั้นสุดท้ายของกระบวนการบำบัดทั้งหมด ซึ่งการหล่อแข็ง เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดโดยเกิดพันธะทางเคมีหรือการตรึง (Fixate) หรือการกักเก็บ (Encapsulate) ของเสียไว้ภายในโครงผลึกของของแข็งที่เกิดขึ้น วิธีการตรึงทำได้ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ โดยนำของเสียมาผสมกับสารหรือวัสดุที่สามารถจับตัวกันเป็นของแข็งได้ ส่วนการกักเก็บเป็นวิธีการทางกายภาพโดยใช้สารห่อหุ้มของเสียไว้ภายใน

จุดประสงค์ของทั้ง 2 วิธีข้างต้นเพื่อทำให้ของเสียอยู่ในสภาวะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ลดการซึมผ่านของของเสียหรือรั่วไหลออกสู่ภายนอกได้น้อยและของแข็งที่ได้สามารถรับกำลังอัดหรือมีความแข็งแรงพอสมควร สามารถนำไปกลบฝังได้

กระบวนการหล่อแข็งที่ใช้ในการบำบัดของเสีย [12] 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 ราคาถูกและใช้ได้ดีกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic waste) หลายชนิด เช่น โลหะหนักต่าง ๆ เป็นต้น

สำหรับกระบวนการอื่น ๆ เป็นกระบวนการที่ใช้กับของเสียที่เป็นปัญหามาก ๆ เช่นกากกัมมันตภาพรังสี (Radioactive waste) หรือของเสียที่มีสารอินทรีย์อยู่สูง รวมทั้งมีราคาในการบำบัดสูงจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการบำบัดของเสียทั่ว ๆ ไป

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะ Cement - based techniques

2.1.2 **Cement - based techniques**

เป็นกระบวนการที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลานอื่น ๆ เช่น ขี้เถ้าลอย ขี้เถ้าแกลบหรือฝุ่นซีเมนต์ เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพและลดการรั่วไหลจากก้อนหล่อแข็งที่ได้ เทคนิคนี้สามารถใช้กับของเสียที่มีสารอินทรีย์ปนอยู่ได้สูงถึง 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำไปกลบฝังได้อย่างปลอดภัยจึงทำให้วิธีการหล่อแข็งเป็นที่นิยมในการบำบัดกากตะกอนโลหะหนักทั่วไป

การนำกากของเสียแต่ละชนิดมาบำบัดด้วยวิธีการหล่อแข็ง จำเป็นต้องผ่านการทดสอบศักยภาพในการหล่อแข็งที่เหมาะสม กากของเสียที่สามารถนำมาบำบัดด้วยวิธีนี้ ได้แก่ เศษโลหะ (Steelmill) ของเสียจากโรงงานชุบโลหะและหลอมตะกั่ว ของเสียจากโรงฟอกย้อม จากหอหล่อเย็น เถ้าจากเตาเผากากของเสีย คะตะไลส์ที่เสื่อมสภาพ ออกไซด์ที่เสื่อมสภาพ กากตะกอนจากโรงงานผลิตอาหาร กากแร่และกากตะกอนจากเครื่องกำจัดก๊าซ (Gas scrubber)

2.1.3 **ตัวประสาน (Binding materials)**

ในกระบวนการหล่อแข็งด้วยวิธี Cement - based techniques วัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน คือ

ก) ซีเมนต์ [23,28]

ตามที่กำหนดไว้ใน ASTM C150 ชนิดของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานมีอยู่ 5 ชนิดด้วยกัน ซึ่งจะกล่าวโดยย่อดังนี้

ชนิดที่ I เป็นซีเมนต์ธรรมดาหาได้ทั่ว ๆ ไป และใช้ในงานส่วนมาก

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

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

ชนิดที่IV เป็นซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ทำขึ้นโดยใช้ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตน้อย แต่ใช้ไดแคลเซียม ซิลิเกต (C_2S) มาก ซีเมนต์ชนิดนี้ใช้กันมากในการก่อสร้างพวกคอนกรีตหลา เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าขณะแข็งตัว

ชนิดที่ V เป็นชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้ดี เพราะมีปริมาณไตรแคลเซียม

อะลูมิเนตน้อยมาก ปกติไม่เกินร้อยละ 5 แต่ถ้าจะให้ดีไม่ควรให้เกินร้อยละ 4

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิคอน อะลูมิเนียม และเหล็ก เป็นต้นซึ่งสัดส่วนของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ (Portland cement)[11] โดยทั่วไปมีส่วนประกอบโดยน้ำหนัก ดังนี้

ตารางที่ 1 สัดส่วนของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ (Portland cement)

สารประกอบออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	63.8
SiO_2	20.2
Al_2O_3	5.4
Fe_2O_3	2.9
SO_3	2.6
MgO	1.5
K_2O	0.5
Na_2O	0.3

สารเหล่านี้ทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบ สารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิดที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์หลังการเผาแล้ว มีดังนี้

ตารางที่ 2 สารประกอบที่มีอยู่ในซีเมนต์หลังการเผา

สารประกอบ	สูตรเคมี	สัญญลักษณ์
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3CaO.SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2CaO.SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3$	C_4AF

เมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำจะกลายเป็นซีเมนต์เพสท์ ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ทำให้เกิดความเหนียว และเกาะแน่นกับวัสดุผสม ออกไซด์ในซีเมนต์จะเปลี่ยนรูปเป็นไฮเดรตเมื่อถูกน้ำ ดังสมการ

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

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

$$3(CaO.Al_2O_3) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

$$3(CaOAl_2O_3) + CaSO_4.2H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.3H_2O$$

ค่าความเป็นด่างที่เกิดโดยปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่ในรูปแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงความสามารถเป็นบัฟเฟอร์ (Buffer) ซีเมนต์เพสท์ที่มีค่าความเป็นด่างสูงและมีพื้นผิวออกซีไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมกับภาวะสำหรับการตกผลึก Amphoteric metal และการดูดติดโลหะ กลไกในการยึดจับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ในของเสียที่ถูกทำให้แข็งตัวนั้นแตกต่างกันไป รูปแบบการยึดจับของโลหะหนักกับของเสียที่แข็งตัวพอสรุปได้ดังนี้

1) อยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในของของเสียแข็งตัว

2) ถูกเกาะติดบนผนังของรูพรุน

3) ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์

ในกรณีที่โลหะหนักถูกล้อมอยู่ในของแข็งหรือเกาะติดอยู่ที่ผิวรูพรุน ความสามารถในการชะละลายของโลหะหนักมีค่าสูงกว่าในกรณีที่โลหะหนักทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์

ข) วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials)

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 - 91 [2, 3] "ปอซโซลาน" คือวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งโดยตัวของมันเองไม่มีสมบัติในการยึดประสาน (Cementtious properties) สารปอซโซลานทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน

การนำสารปอซโซลานมาใช้เป็นวัสดุซีเมนต์ โดยการนำวัสดุที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟมาใช้ร่วมกับหินปูนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบแล้วทำให้สามารถปรับปรุงคุณภาพของมอร์ตาร์ให้ดีขึ้น ทำให้มอร์ตาร์แข็งตัวได้ในน้ำ เมื่อมีการค้นพบวัสดุที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมของดินในตำบลใกล้เคียงกับเมืองปอซซูโอลี (Pozzuoli) และสามารถนำตะกอนดังกล่าวมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของมอร์ตาร์ได้ จึงเรียกวัสดุที่นำมาปรับปรุงคุณภาพนี้ว่า "ปอซโซลาน (Pozzolan)" [13]

ตาม ASTM C 618 - 91 จำแนกสารประกอบปอซโซลานปูน 3 กลุ่ม คือ

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

2) Class F ได้แก่ สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolans) คือ วัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ขี้เถ้าหิน ขี้เถ้าแกลบ เป็นต้น

3) Class C เป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบเช่นเดียวกับข้อ 2 แต่มีข้อกำหนดสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน

ในการจัดประเภทของวัสดุปอซโซลานมีข้อกำหนดสมบัติทางด้านกายภาพ ด้านเคมี และสมบัติเสริมบางประการ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3

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

ปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่เกิดขึ้น คือ

ขั้นตอนที่ 1

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

(C_3S : ไตรแคลเซียมซิลิเกต) (CSH : แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต)

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

(C_2S : ไดแคลเซียมซิลิเกต)

ขั้นตอนที่ 2

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

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

(CAH : แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต)

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และข้อกำหนดเสริมของวัสดุปอซโซลานประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 91[3]

พารามิเตอร์	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Physical Requirements			
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
Supplementary Optional Physical Requirement			
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
Chemical Requirements			
Silicon dioxide (SiO_2) plus aluminum oxide (Al_2O_3) plus iron oxide (Fe_2O_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
Supplementary Optional Chemical Requirement			
Available alkalies, as Na_2O, max, %	1.5	1.5	1.5

จากสมการจะเห็นว่า วัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเพื่อทำให้เกิดสารซีเมนต์ในการยึดประสานในขั้นตอนที่ 2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในขั้นตอนแรกเกิดขึ้นช้า ดังนั้นการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงแรก ๆ ของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานจะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อเวลาผ่านไปกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาในวัสดุปอซโซลานแล้วเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์

2.2 กากของเสีย

2.2.1 คำจำกัดความของกากของเสีย (Solid waste)[28]

กากของเสีย (Solid waste) หมายถึง เศษของเหลือใช้ที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ และถูกทิ้งออกไปสู่ระบบของการจัดการที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อม กากของเสียเหล่านี้ ได้แก่ มูลฝอย สิ่งปฏิกูล และของเสียที่เป็นอันตราย ในปัจจุบันมีกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการจัดการกากของเสียเหล่านี้หลายฉบับ ได้แก่ พระราชบัญญัติ สาธารณสุข พ.ศ. 2484 พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 และพระราชบัญญัติวัตถุมีพิษ 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 เถ้า มูลสัตว์และซากสัตว์ รวมตลอดวัสดุอื่น ๆ ใด ซึ่งเก็บกวาดจากถนน ตลาด ที่เลี้ยงสัตว์หรือที่อื่น ๆ

สิ่งปฏิกูล หมายถึง อุจจาระและปัสสาวะ รวมตลอดถึงวัสดุอื่นใดซึ่งเป็นสิ่งสกปรกโสโครกและมีกลิ่นเหม็น

ของเสียที่เป็นอันตราย หมายถึง ของเสียหรือสิ่งที่เจือปนด้วยของเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นหรือสมบัติทางด้านกายภาพ เคมี หรืออื่น ๆ ที่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการตายหรือการเจ็บป่วย ทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด เก็บกัก หรือกำจัด

2.2.2 การจัดประเภทกากของเสีย

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

การวิเคราะห์ตัวอย่างกากของเสียมากกว่าค่ามาตรฐาน แสดงว่าเป็นกากของเสียอันตราย (Hazardous waste)

ตารางที่ 4 ค่ามาตรฐานของโลหะหนักในน้ำสกัด[5,9]

ลำดับ	ชื่อสาร	ค่ามาตรฐาน(mg/l)	
		US EPA[5]	กรมโรงงานอุตสาหกรรม[9]
1.	อาร์เซนิค (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.	ซีลิเนียม (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) วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น เศษเหล็กเหนียว เศษเหล็กสแตนเลส เป็นต้น ถูกป้อนเข้าเตาหลอม อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาหลอมขึ้นอยู่กับชิ้นงานแต่ละขนาด น้ำเหล็กจากเตาหลอมจะถูกนำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์โดยทั่ว ๆ ไป สมบัติของน้ำเหล็กที่ต้องการคือ มีอุณหภูมิประมาณ 1,300 - 1,600 °C ความหนืดซึ่งมีค่าต่ำที่อุณหภูมิสูง ถ้าค่าความหนืดสูงจะทำให้น้ำเหล็กเสียความสามารถในการไหล การไหลของน้ำเหล็กและความตึงผิวของน้ำเหล็กเนื่องจากเมื่อน้ำเหล็กสัมผัสกับแบบหล่อทรายทำให้มีแรงต้านทานไม่ให้น้ำเหล็กซึมผ่าน [20]

2.3.1.2 การเตรียมทรายสำหรับทำแบบหล่อ (Sand preparation) [27] การเตรียมทราย เตรียมโดยนำเอาทรายที่มีสมบัติตามที่กำหนด กล่าวคือ ทรายที่นำมาทำแบบหล่อต้องมีสมบัติ ดังนี้ คือ

ก) ขึ้นรูปได้ง่าย (Formability) และทำแบบหล่อได้สะดวก โดยที่มีความแข็งแรงพอ แบบหล่อที่ทำเสร็จแล้วจะต้องแข็งแรงพอที่จะยกไปได้และเทน้ำเหล็กเข้าไปได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ดังนั้นจึงต้องมีความแข็งแรงทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

ข) จะต้องให้ก๊าซซึมออกได้ (Permeability) สะดวกพอ ถ้าอากาศหรือก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สามารถซึมผ่านเม็ดทรายออกไปจากแบบหล่อเร็วพอในขณะเทน้ำโลหะแล้วอาจเกิดจุดเสียประเภทรูโหว่ที่เกิดจากการหดตัวและรูพรุนที่ผิว

ค) ขนาดของเม็ดทรายและปริมาณของเม็ดทรายแต่ละขนาดต้องเหมาะสมถ้าใช้ทรายละเอียดทำแบบหล่อผิวของชิ้นงานละเอียดดี แต่ถ้าเม็ดทรายละเอียดเกินไปทำให้ ก๊าซออกไม่ได้ถูกกักไว้ภายในทำให้เกิดรูพรุน (Blow hole) ดังนั้นต้องจัดให้ขนาดของเม็ดทรายและปริมาณของเม็ดทรายแต่ละขนาดเหมาะสม ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงทั้งสองประเด็นข้างต้น

ง) ต้องมีความทนไฟ (Refractoriness) สูงพอ คือต้องทนได้เมื่อเทน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงลงในแบบหล่อ

จ) มีส่วนผสมที่เหมาะสม คือ เมื่อเม็ดทรายสัมผัสกับน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพ (Physical) และทางเคมี ดังนั้นจึงไม่ควรมีส่วนผสมใด ๆ ที่จะทำให้เกิดก๊าซหรือที่จะละลายไปกับน้ำเหล็ก

ฉ) นำมาใช้ได้อีกทรายที่ดีจะต้องใช้ได้หลายครั้งเพื่อความประหยัด

ช) มีราคาถูก

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

2.3.1.3 การเตรียมแบบหล่อ (Moulding line) การเตรียมแบบสำหรับการหล่อคือนำแบบทรายที่ได้จากเครื่องปั้นแบบซึ่งมีที่สำหรับเทน้ำเหล็กให้เป็นชิ้นส่วนที่ต้องการ และมีช่องระบายอากาศร้อนหลังเทน้ำเหล็กลงไปแบบทรายที่ได้จะเกิดการอัดทรายเข้ากับแบบชิ้นงานที่เรียกว่า Pattern เมื่อดึงเอาแบบออกจะปรากฏรอยบุ๋มบนทราย เป็นรูปชิ้นส่วนตามต้องการ หลังจากการเทน้ำเหล็กลงไปในแบบและปล่อยให้เหล็กเย็นลงแล้วจึงแกะแบบออกและนำชิ้นงานหล่อไปผ่านขั้นตอนอื่นต่อไป

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

เหล็กแข็งตัวแล้วถูกแยกออกจากแบบทรายไปผ่านกระบวนการอื่นต่อไป ส่วนทรายที่ได้จากการรื้อแบบจะถูกนำกลับไปใช้ใหม่

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

2.3.1.6 การคัดแยกขนาดชิ้นงาน (Sorting) เป็นการคัดแยกขนาดของชิ้นงาน ซึ่งในกระบวนผลิตชิ้นงานมีหลายขนาดที่แตกต่างกัน จึงต้องมีการคัดแยกไม่ให้เกิดปะปนกัน แล้วจึงส่งไปผ่านขั้นตอนอื่นต่อไป

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 ควันจากคิวโปลา หรือเตาไฟฟ้า

2.3.2.2 ฝุ่นจากทรายทำแบบ

2.3.2.3 กลิ่นเหม็นจากน้ำมันหรือเรซินที่ใช้ในการทำไส้แบบ

2.3.2.4 เสียงและความสั่นสะเทือนของเครื่องทำแบบหล่อหรือเครื่องสั่นทรายออก

2.3.2.5 น้ำสกปรกปนน้ำมันหรือน้ำใช้ในการชำระล้าง

2.3.2.6 กากของเสียที่เหลือจากการหล่อหลอม

2.3.2.7 ทรายทำแบบที่หมดสภาพแล้ว

ปัญหาเหล่านี้มีผลเสียต่อสุขภาพของคนงานในโรงหล่อ และต่อผู้อยู่อาศัยใกล้โรงหล่อดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจัดการและกำจัดสิ่งซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ เช่น การกำจัดฝุ่นจากเตาหลอม อาจใช้ เครื่องดักฝุ่นชนิดลมหมุน (Cyclone) เครื่องดักฝุ่นชนิดเปียก (Wet scrubber) หรือ เครื่องดักฝุ่นชนิดถุงกรอง (Baghouse filter) ในกรณีที่ใช้เตาไฟฟ้าซึ่งมีฝุ่นขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ เครื่องกำจัดฝุ่นที่เกิดจากเตาหลอมประเภทนี้จึงใช้เครื่องดักฝุ่นชนิดถุงกรอง สำหรับเครื่องดักฝุ่นที่ใช้กำจัดฝุ่นจากการเตรียมแบบหล่อทราย โดยทั่วไปใช้ Cyclone หรือ Wet scrubber แต่เครื่องดักฝุ่นทั้งสองประเภทนี้ไม่สามารถกำจัดฝุ่นขนาดเล็กได้ ดังนั้นจึงอาจใช้เครื่องดักฝุ่นชนิดถุงกรองเพิ่มขึ้นมา ในการกำจัดน้ำเสียส่วนใหญ่ใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี ตะกอนที่ได้นำไปกำจัดน้ำออกแล้วนำไปกำจัดรวมกับฝุ่นที่เก็บได้จากเครื่องดักฝุ่น น้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนต้องนำไปปรับค่า pH ก่อนปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม ในการแก้ปัญหาเสียง โดยทั่วไปมักสร้างฝาครอบเครื่องที่ทำให้เกิดเสียง ใช้ที่อุดหูหรือที่ครอบหู เป็นต้น

2.3.2 **กากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อหลอม**

กากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อหลอมโลหะทั้งที่เป็นเหล็กกล้าและไม่เป็นเหล็กกล้า จากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต พอสรุปได้ดังนี้

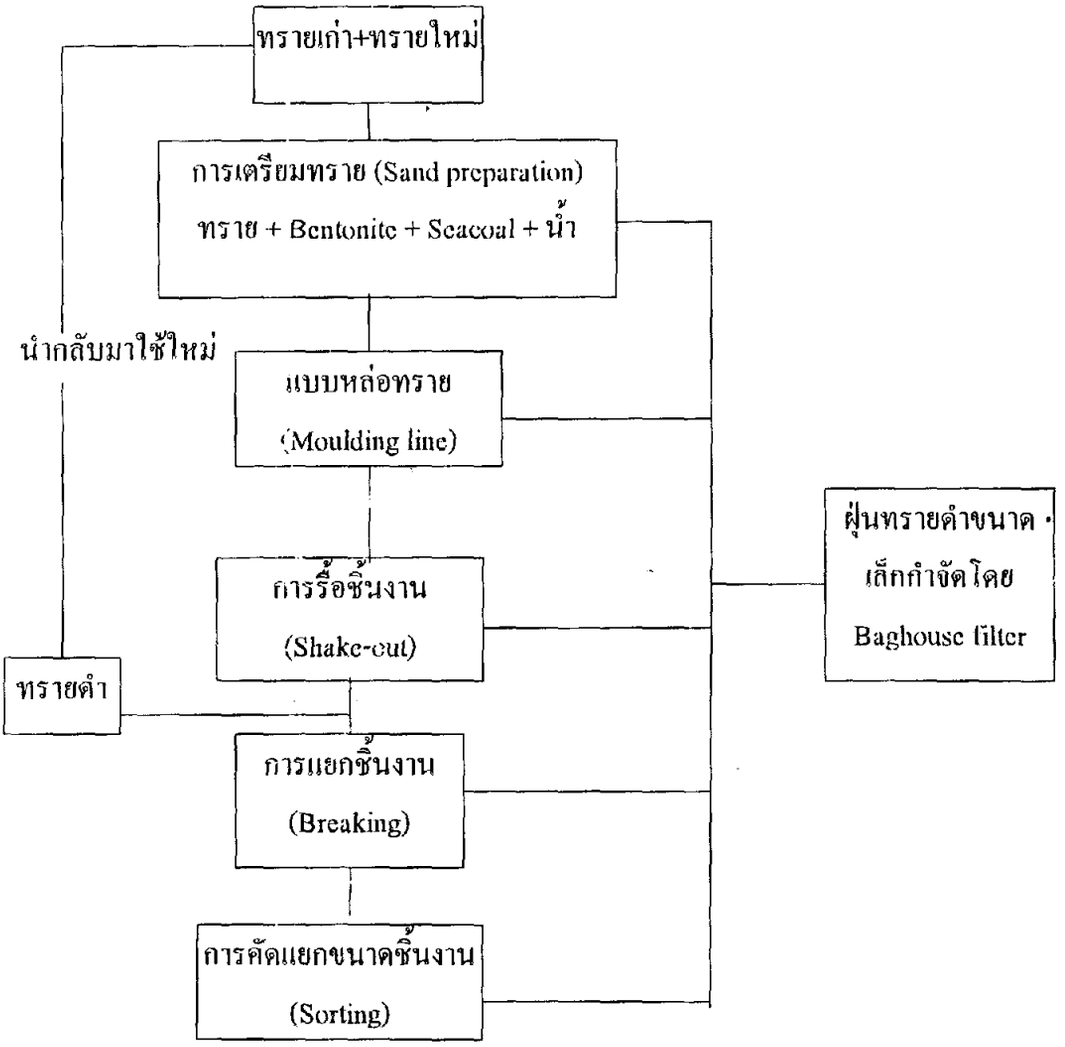
ก) กากของเสียจากระบบกำจัดฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากเตาหลอม

ข) กากของเสียที่เหลือจากการหล่อหลอม

ค) กากของเสียที่เกิดจากแบบหล่อทรายที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ หรือที่มีชื่อเรียกทั่วไปว่า "ทรายดำ"

ง) กากของเสียที่เกิดจากกระบวนการเตรียมแบบหล่อทรายหรือที่เรียกทั่วไปว่า "ฝุ่นทรายดำ" กากของเสียชนิดนี้มีขนาดเล็กกว่า 0.5 mm ส่วนใหญ่จะเก็บรวบรวมโดยใช้ถุงกรอง (Baghouse filter)

โดยทั่วไปโรงงานหล่อหลอมโลหะประเภทนี้ได้มีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.2 ในการกำจัดปัญหาเรื่องฝุ่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการหลังจากนั้นจึงนำไปทิ้งในบริเวณที่ทางโรงงานได้จัดเตรียมไว้ โดยนำไปกองทิ้งไว้



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงรายละเอียดการเกิดกากของเสียในส่วนของการเตรียมแบบหล่อทราย

บทที่ 3
วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีดำเนินการ

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการหล่อแข็งโดยใช้ฝุ่นทรายดำ มีวัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีดำเนินการ ดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.1 ตะแกรงคัดขนาด (ขนาด 0.5 มม.และ 5.0 มม.)

3.1.2 เครื่องชั่ง

3.1.3 บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร

3.1.4 แบบหล่อขนาด 5x 5 x 5 เซนติเมตร และแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความสูงเท่ากับ 5 x 10 เซนติเมตร

3.1.5 เกรียง

3.1.6 แท่นทดสอบหาอัตราการไหลแผ่

3.1.7 แท่งกระทุ้ง ตามมอก.15 เล่ม 12-2533 [25]

3.1.8 เครื่องทดสอบความสามารถรับแรงอัด

3.1.9 เครื่องผสมปูนซีเมนต์

3.1.10 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

3.2 ตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

3.2.1 แหล่งที่มาของตัวอย่าง

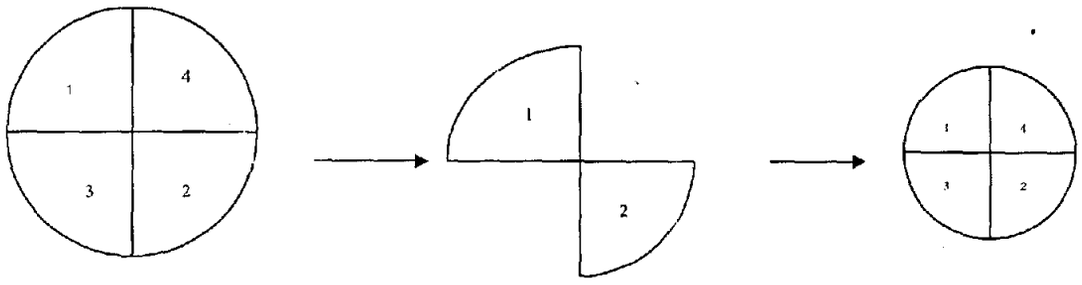
บริษัท นวโลหะอุตสาหกรรม จำกัด ตั้งอยู่ที่ 19 หมู่ 3 ถนนสุวรรณศร ตำบลบัวลอย อำเภอหนองแค จังหวัด สระบุรี

3.2.2 ตัวอย่างที่นำมาศึกษา ได้ทำการเก็บตัวอย่าง คือ

ฝุ่นทรายดำจาก Baghouse

3.2.3 **การเก็บตัวอย่าง**

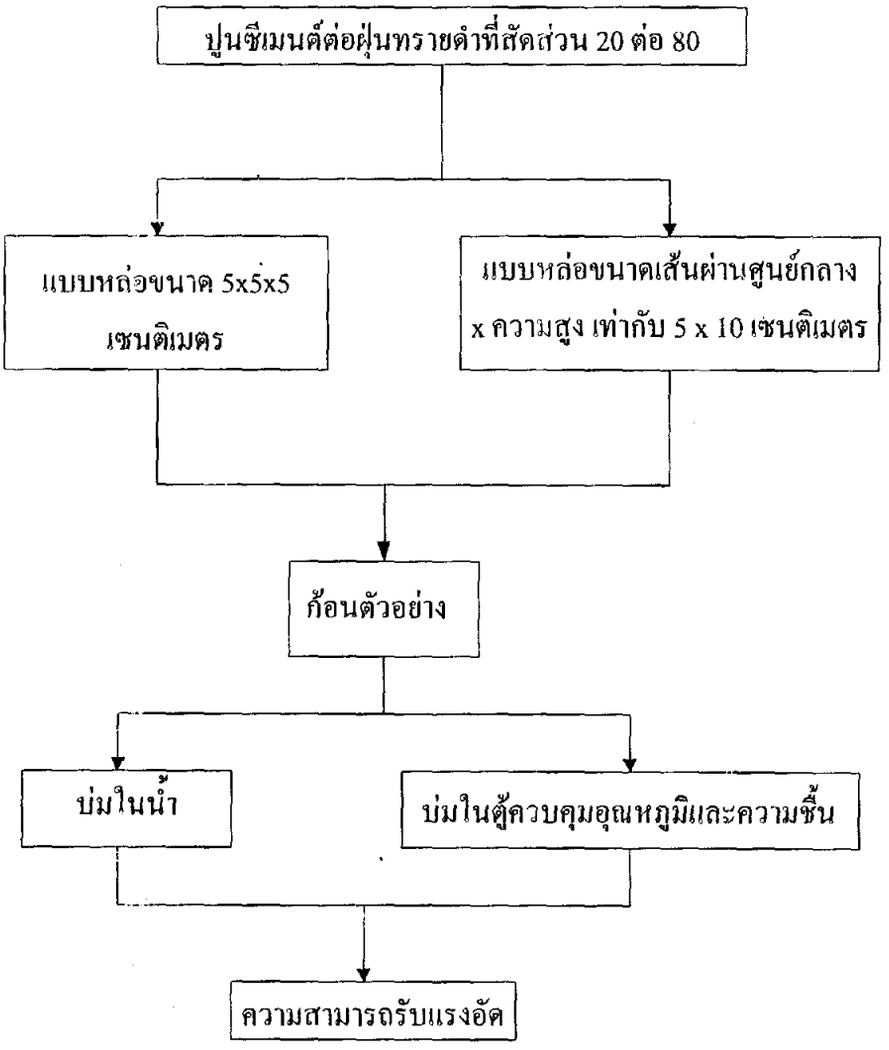
การสุ่มตัวอย่าง ทำการสุ่มตัวอย่างด้วยวิธีแบ่งสี่ (Quartering) เพื่อให้ได้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถใช้เป็นตัวแทนของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ โดยนำตัวอย่างประมาณ 100 กิโลกรัมคลุกเคล้าให้เข้ากันแบ่งออกเป็น 4 ส่วน นำตัวอย่าง 2 ส่วนที่กองอยู่ตรงข้ามกันมารวมกันแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำตัวอย่าง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



รูปที่ 2 การทำ Quartering

3.3 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาโดยสรุปดังแสดงในรูปที่ 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 ซึ่งน้ำที่ใช้เป็นน้ำประปามาหาปริมาณน้ำที่ เหมาะสมโดยวิธีการวัดค่าการไหล (Flow) ตาม มอก.15 เล่ม 12-2533 โดยให้มีค่าการไหลอยู่ในช่วง 110 ± 5 เพื่อให้ได้ค่าความสามารถรับกำลังอัดสูงที่สุดและสามารถทำงานได้โดยสะดวก จากนั้นเมื่อทราบปริมาณน้ำที่เหมาะสมแล้ว จึงนำไปใช้ในการหล่อก้อนตัวอย่างโดยหล่อในแบบหล่อ 2 รูปทรง คือรูปลูกบาศก์ขนาด 5 x5 x5 เซนติเมตร และรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความสูงเท่ากับ 5 x 10 เซนติเมตร

3.3.3 **ศึกษาวิธีการบ่มก้อนตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการใช้งาน**

นำก้อนตัวอย่างทั้งหมดไปบ่ม โดยแยกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกซึ่งประกอบด้วยก้อนตัวอย่างขนาด 5 x5 x5 เซนติเมตร จำนวน 15 ก้อนและก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความสูงเท่ากับ 5 x 10 เซนติเมตรจำนวน 15 ก้อนนำไปบ่มในน้ำ และกลุ่มที่สองจำนวนตัวอย่างเช่นเดียวกับกลุ่มแรกนำไปบ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

3.3.4 **ศึกษาหาความสามารถรับกำลังอัด (Compressive strenght)**

นำก้อนตัวอย่างจากข้อ 3.3.3 ที่มีช่วงอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับไปทำการวิเคราะห์หาค่าความสามารถรับกำลังอัด

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

ในการศึกษาหาค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ที่ทำการบ่มในน้ำและบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น พบว่า

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

- ก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์ที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น 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

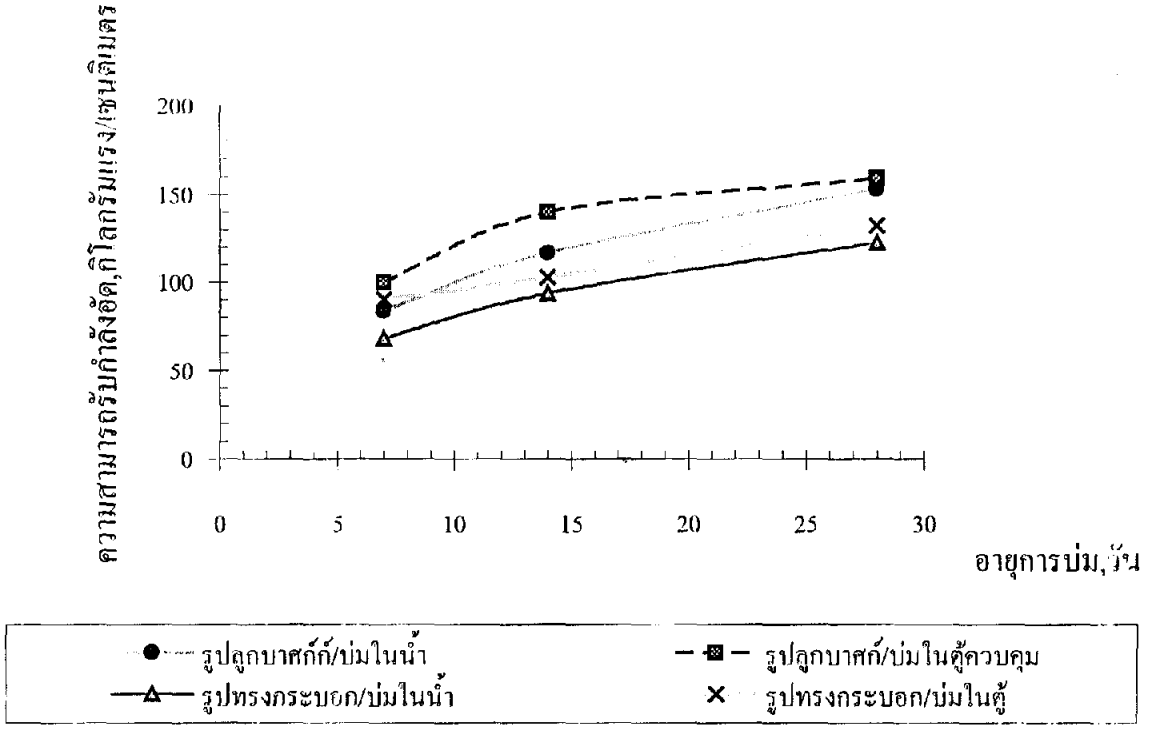
- ก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เฉลี่ยเท่ากับ 90.1, 102.6 และ 132.1 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังปรากฏในตารางที่ 6

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	ก้อนทอสอบ	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 แต่ยังต้องผสมปูนซีเมนต์ลงไปด้วยในสัดส่วนที่สูงถึงร้อยละ 20 เนื่องจากปฏิกิริยาของฝุ่นทรายดำเกิดขึ้นได้ช้ามากต้องใช้เวลานานจึงจะได้ก้อนหล่อแข็งที่ให้ความสามารถในการรับกำลังอัดได้ตามมาตรฐานการฝังกลบ และเนื่องจากฝุ่นทรายดำมีขนาดอนุภาคใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ถ้านำฝุ่นทรายดำเพียงอย่างเดียวมาทำเป็นก้อนหล่อแข็งจะทำให้ก้อนหล่อแข็งที่ได้มีรูพรุนมากไม่เหมาะสมต่อการนำมากำจัดกากตะกอนโลหะหนักเพราะจะทำให้เกิดการชะละลายของโลหะหนักออกมาได้มาก ดังนั้นการเติมปูนซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่ามากลงไปเพื่อทำให้รูพรุนภายในก้อนหล่อแข็งมีขนาดเล็กลงน้ำจึงซึมผ่านไปได้ยากขึ้นผลคือลดการชะละลายของโลหะหนัก นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดได้อีกด้วย

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

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

กว่าคอนกรีตทั่วไป ส่งผลให้ผลต่างของความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากการทดลองในสภาพเปียกและสภาพแห้งต่างกันน้อยกว่าของคอนกรีตทั่วไป และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกและรูปลูกบาศก์ พบว่าก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์ให้ความสามารถรับกำลังอัดสูงกว่าก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกโดยเฉลี่ยร้อยละ 25 ทั้งในสภาวะที่บ่มในน้ำและบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าทั้งสภาวะการบ่มและรูปทรงของก้อนหล่อแข็งล้วนมีผลกระทบโดยตรงต่อการให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งทั้งสิ้น ซึ่งสามารถอธิบาย โดยสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สภาวะการบ่ม

สาเหตุที่ทำให้ความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำมีค่าน้อยกว่าการบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นนั้นเป็นผลเนื่องมาจาก

1) ในสภาวะการบ่มในน้ำมีการละลายของสารเคมีต่าง ๆ ที่มีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาการแข็งตัวของก้อนหล่อแข็ง ซึ่งสารเคมีเหล่านี้เป็นส่วนผสมที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์และฝุ่นทรายดำทำให้การแข็งตัวของก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำเกิดขึ้นได้ช้ากว่าก้อนหล่อแข็งที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น 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 เข้าใกล้กันมากขึ้นทำให้ระบบมีความแข็งแรงมากขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงวันเดอร์วาวล์ (van der waal's bonding) ที่มีความแข็งแรงมากกว่า Hydrogen bonding ดังนั้นก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำจึงมีความสามารถรับกำลังอัดน้อยกว่าก้อนหล่อแข็งที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

3) การลดลงของพันธะ Si-O-Si ซึ่งเป็นสารที่ให้ความแข็งแรงกับก้อนหล่อแข็งเนื่องจากน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะ Si-O-Si ได้

4) การลดลงของแรงยึดเหนี่ยวทางเชิงกล (Mechanical interlock) เพราะน้ำทำหน้าที่คล้ายกับเป็นตัวหล่อลื่นทำให้การยึดเหนี่ยวทางเชิงกลลดลงส่งผลให้ก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำมีความเปราะมากกว่าก้อนหล่อแข็งที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

จากคำอธิบายข้างต้นจะเห็นว่าน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการหล่อแข็ง หากขาดน้ำก็จะทำให้ก้อนหล่อแข็งแห้งและแตกร้าวได้เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาต่าง

4) การลดลงของแรงยึดเหนี่ยวทางเชิงกล (Mechanical interlock) เพราะน้ำทำหน้าที่คล้ายกับเป็นตัวหล่อลื่นทำให้การยึดเหนี่ยวทางเชิงกลลดลงส่งผลให้ก้อนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำมีความเปราะมากกว่าก้อนหล่อแข็งที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

จากคำอธิบายข้างต้นจะเห็นว่าน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการหล่อแข็ง หากขาดน้ำก็จะทำให้ก้อนหล่อแข็งแห้งและแตกร้าวได้เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหล่อแข็ง เช่นปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เป็นต้น แต่ถ้ามีน้ำมากเกินไปก็จะทำให้ก้อนหล่อแข็งมีค่าความสามารถรับกำลังอัดลดลง

5.1.2 รูปทรงของก้อนหล่อแข็ง

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์และก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกพบว่าก้อนหล่อแข็งรูปทรงลูกบาศก์มีความสามารถรับกำลังอัดสูงกว่าก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกโดยเฉลี่ยร้อยละ 25 ทั้งในสภาวะที่บ่มในน้ำและบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งทั้งสองรูปทรงที่แตกต่างกันเกิดจากสาเหตุ 2 ประการคือ ความแตกต่างกันของรูปทรงและความเสียดทานของก้อนหล่อแข็งกับแท่นทดสอบ

ความแตกต่างของรูปทรงมีผลต่อค่าความสามารถรับกำลังอัดสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎี "Weak link" ซึ่งกล่าวว่าความแข็งแรงของก้อนวัสดุถูกกำหนดโดยส่วนประกอบที่อ่อนที่สุดที่เชื่อมกันอยู่ในวัสดุนั้น ถ้าขนาดของก้อนวัสดุใหญ่ขึ้นจะมีส่วนประกอบที่อ่อนที่สุดมากขึ้นส่งผลให้ก้อนวัสดุแตกหักได้ง่ายขึ้นที่แรงกดต่ำลง

ในระหว่างการทดสอบความสามารถรับกำลังอัดนอกเหนือจากจะมีแรงกดตามแนวแกนเดียวกัน (Uniaxial compression) แล้วยังมีแรงที่เกิดจากความเสียดทาน (Friction) ระหว่างปลายของก้อนหล่อแข็งและแท่นเหล็กที่ใช้รองสำหรับทดสอบแรงกด ความเสียดทานนี้เกิดขึ้นจากความแตกต่างของโมดูลัสความยืดหยุ่น และสัดส่วน Pission's ของเหล็กและก้อนหล่อแข็งเป็นเหตุทำให้แรงเครียดตามขวาง (Lateral strain) ในแท่นเหล็กมีค่าน้อยกว่าการขยายตัวตามขวาง (Lateral expansion) ของปลายของตัวอย่าง ดังนั้นความเสียดทานจึงทำให้แท่นเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดการขยายตัวตามขวางของก้อนตัวอย่าง และทำให้เกิดแรงดันตามขวาง (Lateral confining pressure) ใกล้กับปลายของก้อนหล่อแข็ง โดยที่แรงดันที่เกิดขึ้นมานี้ถ้ามีเหลืออยู่ในก้อนหล่อแข็งมากจะทำให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งมากขึ้นด้วย เพราะแรงดันนี้เป็นแรงที่เสริมแรงต้านแรงกด แรงดันนี้จะมีค่าสูงสุดที่ปลายของก้อนหล่อแข็งและจะค่อยๆ ลดลงจนหมดที่ระยะ $\sqrt{3}/2$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางของตลอดเนื้อก้อนหล่อแข็ง แรงดันนี้เป็นสัดส่วนผกผันกับสัดส่วนระหว่าง l/d (ความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง) ในตัวอย่างก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลองมีสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 แต่ในก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์จะมีสัด

ส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (ระยะระหว่างด้านที่ขนานกัน) เท่ากับ 1 ดังนั้นในก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกจะมีระยะความสูงมากพอที่จะทำให้แรงดันลดหายไปได้อย่างสมบูรณ์มากกว่าในก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์ที่มีความสูงน้อยกว่า 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 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการบำบัดกากของเสียอันตรายด้วยเทคนิคการหล่อแข็งโดยใช้ฝุ่นทรายดำผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ที่สัดส่วนฝุ่นทรายดำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 80 ต่อ 20 คือ ก้อนหล่อแข็งรูปลูกบาศก์ที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เนื่องจากก้อนหล่อแข็งดังกล่าวให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดได้สูงที่สุด

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เนื่องจากการศึกษาทดลองนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำฝุ่นทรายดำที่เป็นกากของเสียจากกระบวนการหล่อหลอมโลหะมาผสมร่วมกับปูนซีเมเนต์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการหล่อแข็งสำหรับบำบัดกากของเสียอันตราย ดังนั้นฝุ่นทรายดำนี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และพบว่าไม่เข้าข่ายเป็นกากของเสียอันตรายเสียก่อนจึงจะสามารถนำมาใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้หากต้องการนำกากของเสียประเภทอื่นมาประยุกต์ใช้ในงานด้านนี้ ต้องทำการวิเคราะห์เสียก่อนว่ากากของเสียนั้นๆ เข้าข่ายเป็นกากของเสีย

อันตรายหรือไม่ ถ้าพบว่าไม่เข้าข่ายและมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานจึงจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้

5.3.2 จากบทสรุปข้างต้น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ การใช้รูปทรงก้อนหล่อแข็งเป็นรูปลูกบาศก์และบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยในสภาวะดังกล่าวให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดได้สูงที่สุด แต่ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว กำหนดให้ใช้ก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอก โดยไม่ระบุถึงวิธีการบ่มก้อนหล่อแข็ง ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่ามาตรฐานนี้ต้องการให้ก้อนหล่อแข็งที่ทำการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการได้ค่าที่น้อยที่สุดและยังอยู่ในเกณฑ์กำหนดเพื่อความปลอดภัย แต่จะเห็นว่าก้อนหล่อแข็งรูปทรงกระบอกที่บ่มในน้ำให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดที่ต่ำที่สุด แต่สภาวะนี้ไม่เหมาะสมอาจเป็นเพราะว่ากากของเสียอันตรายที่อยู่ภายในก้อนหล่อแข็งสามารถรั่วไหลออกมาปนเปื้อนกับน้ำที่ใช้ในการบ่มได้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นภายในก้อนหล่อแข็งยังไม่สมบูรณ์ ในทางปฏิบัติระดับโรงงานกำจัดกากของเสียอันตรายควรทำการหล่อแข็งกากของเสียอันตรายด้วยรูปทรงลูกบาศก์และบ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเพื่อให้ก้อนหล่อแข็งที่มีกากของเสียอันตรายมีอายุการบ่มเพียงพอที่จะให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดสูงที่สุดและได้เกณฑ์มาตรฐานก่อนนำไปฝังกลบ เพื่อป้องกันปัญหาการรั่วไหลของสารอันตรายที่อาจเกิดขึ้นหากมีการแตกร้าวของก้อนหล่อแข็งภายหลังจากการฝังกลบแล้ว

5.3.3 ควรทำการทดลองต่อในแง่ของการนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปใช้ในการหล่อแข็งกากของเสียอันตรายที่มีปัญหาด้านโลหะหนักเพื่อยืนยันศักยภาพของเทคนิคนี้

เอกสารอ้างอิง

1. American Society for Testing and Materials, 1991, ASTM C219-91 : Standard Terminology Relating to Hudraulic Cement, In 1991 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 166-167.
2. American Society for Testing and Materials, 1991, ASTM C618-91 : Stand Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, In 1991Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, p. 5.
3. 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.
4. 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
5. 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.
6. Jaggi, N., 1988, Solidification of Hazardous Waste using Cementitious Binders, Master Thesis of Engineering, Environmental Engineering Programme, Asian Institute of Technology, pp. 2-5
7. 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
8. Mindiss, Sidney and Young, J. Francis, Concrete, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1981, p410 – 424.
9. 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.

10. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2531, ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์ กำจัด ฝัง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (ฉบับที่ 1), 7 หน้า.

11. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540, ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (ฉบับที่ 6), 44 หน้า.

12. กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2523, การทำซีเมนต์จากเถ้าแกลบ, รายงานกิจกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ, หน้า 31-64.

13. กฤษณา ผากานนท์ , 2537, การกำจัดกากตะกอนนิกเกิลจากกระบวนการชุบโลหะ โดยวิธี Solidification, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข-ค.

14. ไกรทอง ชัยศิริวิเรนทร์, พรพิมล มณีรัตน์, นฤชา เกษมสำราญ, วิจิตร เอมมาโนชญ์ และ สกลแซ่แต้, 2534, การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้ขี้เถ้าแกลบ, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 12-14.

15. จิตรัตน์ ศรีสุโข, 2540, การกำจัดตะกอนโลหะหนักโดยทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และทรายุ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล, หน้า ค-ง.

16. ชูชัย เทียวประสงค์, 2539, การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข-ค.

17. นฤมิต คินิมาน, 2538, การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไน์ต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 1-107.

18. บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตยงสกุล, 2537, การประยุกต์ใช้ขี้เถ้าแกลบจากกะลามะพร้าวซังข้าวโพดและเปลือกถั่วลิสงผสมในวัสดุซีเมนต์, TDO Quarterty, ปีที่ 3, ฉบับที่ 3, หน้า 20-30.

19. บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตยงสกุล, 2538 , การผลิตขี้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกริยาและการประยุกต์ใช้ในบล๊อกซีเมนต์ผสมดินแบบอัดแน่น, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปีที่ 3 ฉบับที่ 2, หน้า 6 - 23.

20. ประทีป เลียงเพ็ชร, 2538, การหล่อแข็งกากตะกอนตะกั่วโดยใช้ปูนซีเมนต์ขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข-ค.

21. พยูร เกตุกราย, 2523, การหล่อโลหะ ภาคผลิต, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), หน้า 13-14.

22. วราภรณ์ กิจชัยนุกูล, 2540, การศึกษาสมบัติทรายดำจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมกับปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็ง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า ข-ค.

23. วิชัย มาชูตระกูล, 2538, การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ปูนซิเมนต์และขี้เถ้าแกลบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 9-12.

24. วินิต ช่อวิเชียร, 2529, คอนกรีตเทคโนโลยี, พิมพ์ครั้งที่ 7, โรงพิมพ์ป.สัมพันธ์พาณิชย์, หน้า 20-23.

25. สมชัย กกกำแหง, 2536, การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในงานก่อสร้างของ กฟผ., วารสาร กฟผ., ปีที่ 2 ฉบับที่ 2, หน้า 3-21.

26. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม,2532, มอก15-2532: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

27. สุนี ปิยะพันธุ์พงศ์, 2535, เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรขยะ (การวิเคราะห์), ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม, หน้า (3-1)–(3-2).

28. หริส สูตะบุตร และ เคนยิ จิยิอิวา, 2517, หล่อโลหะ, สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ, หน้า 1-2.

29. อรุณ ชัยเสรี, 1967, คู่มือการตรวจสอบคอนกรีตของสมาคมคอนกรีตอเมริกัน, พิมพ์ครั้งที่ 5, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 60-61.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการกองฟิสิกส์และวิศวกรรม หัวหน้ากลุ่มงานฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป 2 หัวหน้ากลุ่มงานสิ่งแวดล้อม กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำด้านเทคนิคและความรู้ด้านวิชาการต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบรรณารักษ์ กองสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการที่ช่วยเหลือค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่จำเป็นต่างๆ บริษัท นวโลหะอุตสาหกรรม จำกัด ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างฝุ่นทรายดำที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงผู้ร่วมงานที่ให้ความช่วยเหลือด้านงานพิมพ์เอกสารและผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามที่มีส่วนเกี่ยวข้องในผลงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้