เรียนรู้เพื่อรับใช้สังคม

การศึกษาศักยภาพการนำตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็กจากกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

STUDY OF RECYCLING POTENTIAL OF LADLE FURNACE SLAG (LFS) FROM PRODUCTION PROCESS OF HOT ROLLED COIL STEEL

มิตรชัย รัตนวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย)
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
พ.ศ. 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

การศึกษาศักยภาพการนำตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็กจากกระบวนการผลิต
เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

STUDY OF RECYCLING POTENTIAL OF LADLE FURNACE SLAG (LFS) FROM PRODUCTION PROCESS OF HOT ROLLED COIL STEEL

มิตรชัย รัตนวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ตรวจสอบและอนุมัติให้
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย)
เมื่อวันที่ 19 มิถุนายน พ.ศ. 2560

.....
อาจารย์ ดร.กฤษณัส สุรกิตย์
ประธานกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

.....
อาจารย์ ดร.เทอดพงศ์ ศรีสุขพันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
อาจารย์ ดร.เทอดพงศ์ ศรีสุขพันธุ์
กรรมการ

.....
อาจารย์ ดร.ขัชวาลย์ ช่างทำ
กรรมการ

.....
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา วิเศษมณี ลี
ประธานหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(การจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย)

.....
รองศาสตราจารย์อิสยา จันทร์วิทยานุชิต
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

.....
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เสาวลักษณ์ ลักษมีจรัสกุล
คณบดีคณะสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ HUACHIEW CHALERMPRAKIET UNIVERSITY 華僑崇聖大學

การศึกษาศักยภาพการนำตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็กจากกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

มิตรชัย รัตนวงศ์ 576029
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย)
คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: เทอดพงศ์ ศรีสุขพันธุ์, วศ.ด. (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

บทคัดย่อ

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็ก Ladle furnace slag (LFS) ที่เหมาะสมมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ทรายและหินในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ผู้วิจัยได้ใช้ LFS แทนปูนซีเมนต์ทรายและหินในสัดส่วนร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยได้ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

จากผลการทดลองพบว่าในกรณีที่ใช้ LFS ทดแทนปูนซีเมนต์ จะสามารถทดแทนได้ 75 กก. สำหรับการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้เท่ากับ 168.56 กก./ตร.ซม. (เวลาบ่มคอนกรีต 28 วัน) และสามารถลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จลงได้ 16.40 % สำหรับกรณีที่ใช้ LFS ทดแทนทราย พบว่า ในการผลิตคอนกรีต 1 ลบ.ม. สามารถใช้ LFS แทนส่วนผสมของทรายได้ 156 กก. และ 312 กก. โดยสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ 160.64 กก./ตร.ซม. และ 179.53 กก./ตร.ซม. (เวลาบ่มคอนกรีต 28 วัน) จากส่วนผสมนี้จะทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จลงได้ 12.48 % และ 24.96 % และสำหรับในกรณีที่ใช้ LFS ทดแทนหิน พบว่า ทุกส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดต่ำมาก

คำสำคัญ: กากของเสียอุตสาหกรรม คอนกรีตผสมเสร็จ ตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็ก

STUDY OF RECYCLING POTENTIAL OF LADLE FURNACE SLAG (LFS) FROM PRODUCTION PROCESS OF HOT ROLLED COIL STEEL

MITCHAI RATTANAWONG 576029

MASTER OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL AND SAFETY MANAGEMENT)

THESIS ADVISORY COMMITTEE: THIRDPONG SRISUKPHUN, D.Eng. (ENVIRONMENTAL ENGINEERING)

ABSTRACT

The objectives of this experimental research is studying of the appropriate proportions among cement, sand, rock and ladle furnace slag (LFS) for preparation of ready mixed concrete. LFS was substituted with cement sand and rock with the properties of 25, 50 and 75 % weight by volume. The triplicate experiment was applied.

According to the result, it found that in case that cement was substituted by LFS, it was found that the acceptable content of LFS was 75 Kg per 1 m^3 of the ready mixed concrete. The average strength of concrete was 168.56 ksc (curing time of 28 days). The cost of ready mixed concrete was decreased by16.40%. In the case where sand was substituted by LFS, the acceptable contents were156 Kg and312 Kg per 1 m^3 of the ready mixed concrete. The average strengths of concrete were 160.64 ksc and179.53 ksc (curing time of 28 days) respectively. The costs of ready mixed concrete were decreased by12.46 and24.96 %. In case that rock was substituted by LFS, all of proportions performed strength too low.

Keywords: Industrial waste, ready mixed concrete, Ladle furnace slag

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัท ยู เอ็ม ซี เม็ททอล จำกัด ที่ให้การสนับสนุน LFS ในการจัดทำตัวอย่างคอนกรีตผสมเสร็จ และขอขอบพระคุณศูนย์วิเคราะห์ทดสอบวัสดุก่อสร้างและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ศาลายา) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทดสอบค่าแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งทำให้ผลการทดลองและงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

มิตรชัย รัตนวงศ์

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ HUACHIEW CHALERMPRAKIET UNIVERSITY 華僑崇聖大學

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
กิตติกรรมประกาศ		ค
สารบัญ		ง
สารบัญตาราง		ฉ
สารบัญแผนภูมิ		ช
สารบัญภาพ		ซ
บทที่ 1	**บทนำ**	
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของกาวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2	**แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	
	2.1 กระบวนการเกิดกากอุตสาหกรรม	3
	2.2 คุณสมบัติของกากตะกรัน	3
	2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตะกรัน	5
	2.4 การคัดขนาดและการบดย่อย	6
	2.5 การบ่ม (Aging)	6
	2.6 การนำตะกรันไปใช้งาน	7
	2.7 ปูนซีเมนต์	8
	2.8 คอนกรีตผสมเสร็จ	13
	2.9 การทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)	18
	2.10 การทดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีต	20
	2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3	**ระเบียบวิธีวิจัย**	
	3.1 วิธีการทดลอง	27
	3.2 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ	36
	3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล	36

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
บทที่ 4	**ผลการวิจัย**	
	4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต	37
	4.2 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ	40
บทที่ 5	**สรุปผลการวิจัย**	
	5.1 สรุปผลการวิจัย	42
	5.2 อภิปรายผล	43
	5.3 ข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม		
ภาคผนวก		
	ภาคผนวก ก เอกสารรับรองคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย	51
	ภาคผนวก ข คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	54
	ภาคผนวก ค การตรวจกากขี้เหล็กโดยวิธี Leaching Test	57
	ภาคผนวก ง กระบวนการหลอมเหล็กและเกิดกากอุตสาหกรรม	55
	ภาคผนวก จ ใบรายงานผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	58
ประวัติผู้เขียน		60

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันในกระบวนการหลอมเหล็กกล้า	4
2	เปรียบเทียบส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับกากตะกรัน	4
3	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	11
4	วิธีการตรวจวิเคราะห์โลหะหนัก	23
5	สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ	29
6	ตัวอย่างผลการทดสอบการยุบตัว	30
7	ต้นทุนราคาวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการประเมินต้นทุนของผลิตภัณฑ์	36
8	ราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยของคอนกรีตผสมเสร็จ (แทนปูนซีเมนต์)	40
9	ราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยของคอนกรีตผสมเสร็จ (ทดแทนทราย)	41
10	ราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยของคอนกรีตผสมผสมเสร็จ (ทดแทนหิน)	41

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่		หน้า
1	การดำเนินงานโครงการ	27
2	ค่าการทดสอบการยุบตัว (Slump Test)	37
3	ค่าการรับน้ำหนักส่วนผสมตามค่ามาตรฐาน ASTM C192	39
4	ค่าการรับน้ำหนักส่วนผสมทดแทนปูนซีเมนต์	39
5	ค่าการรับน้ำหนักส่วนผสมแทนทราย	39
6	ค่าการรับน้ำหนักส่วนผสมแทนหิน	40

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การบ่ม (Aging) LFS	7
2	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	9
3	ทรายหยาบ	13
4	การบ่มคอนกรีตในงานสร้างสะพาน	15
5	การบ่มคอนกรีตโดยการขังน้ำ 7 วัน	17
6	การบ่มคอนกรีตโดยใช้กระสอบคลุม รดน้ำให้ชุ่มตลอด 7 วัน	17
7	การบ่มคอนกรีตโดยการใช้น้ำยาบ่ม	18
8	การบ่มคอนกรีตโดยการใช้พลาสติกคลุม (ที่เสา)	18
9	การทดสอบค่าการยุบตัว	19
10	รูปแบบการยุบตัวของคอนกรีต	20
11	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว	31
12	เครื่องมือที่ใช้ในการผสมตัวอย่างทดลอง	31
13	การผสมตัวอย่างทดลอง	32
14	การทดสอบการยุบตัว	33
15	การวัดระยะค่ายุบตัว	33
16	การใส่ปูนลงในแบบหล่อและการ	34
17	การถอดแบบและการบ่มลูกปูน	34
18	การนำลูกปูนตัวอย่างชั่งน้ำหนัก	35
19	การนำลูกปูนตัวอย่างขึ้นวางบนเครื่องทดสอบแรงอัด	35
20	การแตกแบบทำลายของลูกปูนอ่านและค่าบันทึกผล	36

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในประเทศไทยการผลิตเหล็กจะใช้เทคนิคการผลิตที่มีลักษณะเป็นการ Recycle คือ จะเป็นการนำเศษเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาหลอมปรับส่วนผสมมาใช้ใหม่ โดยเตาหลอมเหล็กด้วยไฟฟ้า (Electric Arc Furnace หรือ EAF) จะทำหน้าที่ในการหลอมเศษเหล็กให้กลายเป็นของเหลวและกำจัดสิ่งสกปรกออกจากนั้นจึงนำน้ำเหล็กไปปรับส่วนผสมในถังปรุงน้ำเหล็ก (Ladle) เพื่อให้ส่วนผสมทางเคมีสอดคล้องกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แล้วจึงนำน้ำเหล็กไปหล่อให้แข็งตัวด้วยการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่มีลักษณะเป็นแผ่นหนา (Slab) สุดท้ายจะเหลือกากตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็ก (Ladle Furnace Slag หรือ LFS) ที่ตกค้างไว้ภายในถังปรุงน้ำเหล็กซึ่งมากน้อยขึ้นอยู่กับกำลังผลิตของแต่ละโรงงาน [1]

กากตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็ก (Ladle Furnace Slag หรือ LFS) ประกอบไปด้วย ซิลิกา อะลูมินา แมกนีเซีย แคลเซียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ที่ผ่านมามีการนำ LFS ใช้ในการถมที่หรือนำไปย่อยให้มีขนาดเล็กสำหรับโรยกลบหลุมหรือบ่อของทางเดิน ใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตสำหรับงานถนน [2] ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเม็ดปูน โดยการผสมในเตาเผาปูนร่วมกับส่วนผสมอื่น ๆ ในบางกรณีสามารถใช้งานแทน Portland cement ได้เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีส่วนผสมทางเคมีค่อนข้างใกล้เคียงกัน [3] LFS ถูกจัดให้เป็นของเสียไม่อันตรายจากแหล่งกำเนิดจำเพาะประเภทหรือจำเพาะชนิด จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว หากต้องการกำจัด LFS ด้วยการนำไปฝังกลบ จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการฝังกลบเป็นจำนวนมาก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะนำ LFS ที่ไม่ใช้แล้วมาเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จและศึกษาถึงผลกระทบของค่าการยุบตัว ระยะเวลาการก่อตัว การรับแรงอัด ของคอนกรีตเมื่อใช้ตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็กเป็นมวลรวมทดแทนปูน ทราย และหินของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำลังอัดไม่ต่ำกว่า 260 กก./ตร.ซม. เพื่อที่จะเป็นการส่งเสริมการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียและเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จเนื่องจากเป็นการทดลองเบื้องต้นนี้จะใช้ LFS ที่ได้จาก บริษัท ยู เอ็ม ซี เม็ททอล จำกัด เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีผสมเสร็จแทน ปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ในสัดส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยปริมาตร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็ก (LFS) สำหรับใช้ในงานคอนกรีต โดยศึกษาค่าการยุบของคอนกรีตผสมเสร็จ และการรับกำลังอัดของคอนกรีตภายหลังการบ่ม

2. ศึกษาอัตราการคืนทุนจากการนำเอาตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็ก (LFS) มาเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ และเพิ่มมูลค่าให้กับกากอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. ตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็กที่ใช้ในการทดลองได้มาจากบริษัท ยูเอ็มซี เม็ททอล จำกัด

3. ใช้อัตราการเพิ่ม LFS ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 70 และ 100 แทนที่ปูนซีเมนต์ทรายและหินโดยปริมาตร เพื่อนำไปทดสอบหาค่าการยุบตัวและหล่อเป็นก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 ซม. จำนวน 156 ตัวอย่างต่อสัดส่วนบ่มเป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบการรับกำลังอัดของอัตราส่วนผสม

4. อัตราส่วนระหว่างมวลรวมต่อปูนซีเมนต์ 6 : 1 ถึง 12 : 1

5. มวลรวมที่ใช้ คือ หินคลุกที่มีขายอยู่ทั่วไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เพิ่มมูลค่าให้กับกากอุตสาหกรรมและลดปัญหาการขาดพื้นที่ในการจัดเก็บและฝังกลบ

2. ได้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่มีส่วนผสมจากกากตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็ก โดยใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าท้องตลาด

3. ได้คอนกรีตผสมเสร็จที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานแต่ใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยลง

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเกิดกากอุตสาหกรรม

ตะกรันเตาหลอมเหล็กเกิดจากการหลอมรวมกันของสิ่งที่ปะปนมากับเศษเหล็กกล้าและวัสดุเพิ่มเติม (Fluxing Agent) ที่ใส่ลงไป เช่น หินปูน หรือทราย เพื่อลดอุณหภูมิในการหลอมเหล็กให้ต่ำลง ซึ่งการผลิตตะกรันเตาหลอมเหล็กเพื่อใช้เป็นมวลรวมหยาบทดแทนหินย่อยมีขั้นตอนพอสังเขป คือ เมื่อหลอมเหล็กละลายจนได้ที่แล้วจะเทส่วนที่เป็นตะกรันเตาหลอมเหล็กร้อนที่ลอยอยู่เหนือผิวหน้าของน้ำเหล็กร้อนจากเตาหลอม (Furnace) ลงในรถยกถังที่จอดรออยู่เพื่อนำไปที่ลานเท (Dump Station) จากนั้นจะนำตะกรันเตาหลอมเหล็กร้อนใส่รถบรรทุกเพื่อนำไปเทกองรวมกันไว้ที่โรงงาน (Slag Plant) ก่อนฉีดน้ำเพื่อทำให้ตะกรันเตาหลอมเหล็กร้อนเย็นตัวลง ซึ่งอาจใช้เวลาอย่างน้อย 2 วัน จากนั้นจะย่อยตะกรันเตาหลอมเหล็กที่เย็นตัวแล้วให้มีขนาดเล็กลงตามต้องการด้วยการทุบด้วยลูกเหล็กขนาดใหญ่ (Drop Balling) และเนื่องจากในตะกรันเตาหลอมเหล็กมีเนื้อเหล็กเป็นก้อนใหญ่ (Skull) ติดมาด้วย จึงต้องคัดแยกส่วนที่เป็นเนื้อเหล็กเหล่านี้ออกก่อน หลังจากนั้นจึงนำตะกรันเตาหลอมเหล็กที่ย่อยให้มีขนาดเล็กลงแล้วส่งเข้าโรงคัดแยกขนาด (Slag Processing Plant) ต่อไป ในขั้นตอนนี้จะส่งตะกรันเตาหลอมเหล็กทั้งหมดผ่านแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อคัดแยกตะกรันเตาหลอมเหล็กส่วนที่มีเนื้อเหล็กปนอยู่ (Scrap) ออกไปอีกครั้ง โดยส่วนที่ไม่มีเนื้อเหล็กปนจะส่งผ่านไปยังตะแกรงร่อนคัดขนาดเพื่อแยกตะกรันเตาหลอมเหล็กที่มีขนาดเดียวกันให้อยู่กองเดียวกันให้ตรงกับความต้องการใช้งาน

2.2 คุณสมบัติของกากตะกรัน

ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันทั้ง 2 ชนิดนี้แตกต่างกันตรงอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่อซิลิกา (SiO_2) โดยแคลเซียมออกไซด์มีฤทธิ์เป็นด่างในขณะที่ซิลิกามีฤทธิ์เป็นกรด อัตราส่วนนี้บ่งบอกถึงสมบัติความเป็นกรดเบสของตะกรัน กล่าวคือยิ่งอัตราส่วนมีค่าสูงตะกรันก็มีความเป็นเบสมาก นอกจากนี้ ในบางกรณีหากมีแมกนีเซีย (MgO) อยู่มากจะพิจารณาผลรวมของแคลเซียมออกไซด์กับแมกนีเซียต่อซิลิกา ทั้งแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อได้รับความชื้นของตะกรันแคลเซียมซิลิเกตและไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันในกระบวนการหลอมเหล็กกล้า

Constituents (%)	LF slag
CaO	48-54
SiO_2	12-18
Al_2O_3	1-4
MgO	1-4
Fe_2O_3	14-19
Others	**2.8-4**

ที่มา: กรมอุสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2558 : ออนไลน์.

ส่วนในตารางที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับกากตะกรัน ซึ่งเมื่อดูค่าตัวเลขจากตารางแล้วมีค่าความเป็นปอซโซลานใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์มาก

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับกากตะกรัน

องค์ประกอบ	ปูนซีเมนต์	กากตะกรัน
SiO_2	19.5	34.0
Al_2O_3	4.9	16.2
Fe_2O_3	3.7	1.7
CaO	64.3	36.0
MgO	1.0	7.3
Na_2O	<0.01	0.2
K_2O	0.4	1.0
SO_3	2.1	2.1
Free Lime	1.0	-
Other	0.9	0.1
LOI	2.2	1.4

ที่มา: The Journal of Industrial. May – August 2016 : ออนไลน์.

2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตะกรัน

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตะกรันเหล็กในเตาอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นน้ำเหล็กมี 3 ปัจจัย ได้แก่

1. การดูดซับความชื้นของแคลเซียมออกไซด์ (หินปูน) และแมกนีเซียอิสระ แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียอิสระที่เกิดจากการละลายของฟลักซ์และส่วนผสมที่เติมลงในระหว่างการหลอมเหล็กไม่สมบูรณ์ สามารถเกิดการดูดซับความชื้น (Hydration) ขององค์ประกอบในตะกรันเป็นสารประกอบ ไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม ($Ca(OH)_2$) และแมกนีเซียม ($Mg(OH)_2$) ตามลาดับ เกิดขึ้นภายหลังที่ตะกรันเย็นตัวมายังอุณหภูมิห้องแล้วแคลเซียมออกไซด์รวมตัวกับน้ำได้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่ามาก การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นนี้สามารถก่อให้เกิดการขยายตัวและปริแตกได้ ส่วนแมกนีเซียจะขึ้นกับอัตราการเย็นตัวแมกนีเซียจะตกเป็นผลึกหากเย็นตัวช้า แต่ถ้าเย็นตัวเร็วแมกนีเซียจะจับตัวกันเป็นเนื้อแก้วและสารละลายของแข็งที่ค่อนข้างเสถียร โดยที่แคลเซียมออกไซด์จะทำให้เกิดการบวมตัวภายในระยะเวลาไม่กี่วันจนถึงเป็นสัปดาห์ ด้วยเหตุนี้ตะกรันที่เกิดในเตาอุ่นน้ำเหล็กมักเกิดการขยายตัวเนื่องจากความชื้นรุนแรงกว่าตะกรันในเตาอาร์คไฟฟ้าเนื่องจากส่วนผสมที่แตกต่างกันนั่นเอง

จากการที่มีทั้งหินปูนและแมกนีเซียอิสระอยู่ในตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็กและเกิดการขยายตัว วิธีที่จะทำให้การขยายตัวเนื่องจากความชื้นเกิดขึ้นน้อยลงทำได้โดย (1) พิจารณาปัจจัยการละลายโดยอาศัยข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (2) ควบคุมปริมาณการใช้ปูนขาวและโดโลไมต์ (3) เพิ่มกระแสไหลวนของน้ำเหล็ก เป็นส่งเสริมการละลายของปูนขาวหรือโดโลไมต์ให้ทั่วถึงมากขึ้น (4) ใช้ปูนขาวหรือโดโลไมต์ที่ละเอียดเพื่อให้ละลายได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม หากอนุภาคละเอียดเกินไปอาจทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้ (5) ควบคุมการเย็นตัวของตะกรันให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะช่วยแก้ปัญหาการบวมตัวจากแมกนีเซียอิสระได้

2. การเปลี่ยนเฟสของไดแคลเซียมซิลิเกตขณะเย็นตัว ขณะที่ตะกรันเย็นตัวลงมาอย่างช้า ๆ จะเกิดการเปลี่ยนเฟสของเบต้า-ไดแคลเซียมซิลิเกต (β) เป็นแกมมา-ไดแคลเซียมซิลิเกต (γ) ส่งผลให้เกิดการขยายตัวประมาณร้อยละ 12 โดยปริมาตร และทำให้เกิดการป่นเป็นผงของตะกรันเรียกว่า Falling slag มีขนาดประมาณไม่เกิน 2 มม. ดังนั้นควรทำให้ตะกรันเย็นตัวอย่างรวดเร็วหรืออาจใช้สารตัวเติมต่าง ๆ เพื่อยับยั้งการเปลี่ยนเฟสและการตกตะกอน อีกทั้งลดจุดหลอมตัวของตะกรัน เช่น สารประกอบ Borate หรือสารประกอบ Phosphate ลงในตะกรันหลอมเหลว

3. การหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกระหว่างการเย็นตัวของตะกรันค่อนข้างสูงเนื่องจากสภาพการนำความร้อนของตะกรันต่างทำให้เกิดความเค้นภายในก้อนตะกรัน ทำให้ตะกรันแตกย่อยเป็นก้อนเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 20 มม.

2.4 การคัดขนาดและการบดย่อย

เป็นตะกรันที่ได้จากกระบวนการให้เล็กลงก่อนนำไปใช้งาน ส่วนใหญ่จะใช้เป็นมวลรวมในงานก่อสร้าง การคัดขนาดใช้วิธีการและอุปกรณ์คล้ายกับงานทางเหมืองแร่ ได้แก่ เครื่องบดย่อยและตะแกรงคัดขนาด และจำเป็นต้องคัดแยกเอาเหล็กที่ติดตกค้างมากับตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็กออกด้วย ขั้นตอนการเตรียมตะกรันมีลำดับดังนี้

1. Main steel slag jaw/cone crusher ให้มีขนาดประมาณ 25 มม.
2. Bucket conveyer ขนย้ายวัตถุดิบที่ผ่านการบดแล้วไปตามสายพานสู่เครื่องบดย่อยละเอียดขึ้น
3. Secondary slag milling machine ให้มีขนาดประมาณ ¾ มม.
4. Bucket conveyer ขนย้ายวัตถุดิบไปตามสายพานไปยังเครื่องแยกเหล็ก
5. Magnetic scrap/chips separating machine แยกเอาส่วนที่เป็นเหล็กด้วยการใช้แม่เหล็กในการดูด
6. Ball mill เป็นการบดในขั้นตอนสุดท้าย

2.5 การบ่ม (Aging)

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าหินปูนอิสระสามารถก่อให้เกิดการบวมตัวของตะกรันได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เกิดจากการบวมน้ำของแมกนีเซียมในระยะยาว การทำให้ตะกรันดูดซับความชื้นในบรรยากาศและขยายตัวอย่างเต็มที่ก่อนนำไปใช้งานเป็นการเพิ่มความเสถียรของขนาดตะกรันได้เรียกว่า การบ่ม (Aging) ซึ่งมีหลายวิธีดังแสดงในรูปที่ 1 เทคนิคการบ่มหลัก ๆ มีดังต่อไปนี้

1. ตากไว้ในกลางแจ้ง (Normal aging) กองทิ้งไว้ในพื้นที่เปิด ให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมอย่างเต็มที่ ใช้ระยะเวลาตั้งแต่ 6 เดือนขึ้นไป
2. บ่มด้วยไอน้ำอิ่มตัว (Open air steam aging) กองตะกรันเหล็กไว้บนท่อพ่นไอน้ำและปิดไว้ด้วยฉนวนกันความร้อน ใช้ระยะเวลา 1-2 สัปดาห์
3. บ่มด้วยไอน้ำอัดแรงดัน (Pressurized steam aging) ใส่ตะกรันไว้ในหม้ออัดความดันไอน้ำ ใช้ระยะเวลาตั้งแต่ 1-10 ชั่วโมง

ภาพที่ 1 การบ่ม LFS

ที่มา: รายงาน EIA of GJS. มกราคม-มิถุนายน 2558 : 105.[4]

2.6 การนำตะกรันไปใช้งาน

การนำตะกรันทั้งสองชนิดมาใช้ใหม่ต้องคำนึงถึงปริมาณของแคลเซียมและซิลิกาเป็นหลัก การนำตะกรันกลับมาใช้งานนอกจากการบดย่อยขนาดให้เหมาะสมแล้ว ยังต้องทำให้ส่วนผสมของตะกรันมีความเสถียรทางเคมีและลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตะกรันเนื่องจากความชื้นด้วยการบ่มก่อนนำไปใช้งาน ตะกรันที่เกิดในเตาอาร์คไฟฟ้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ดังนี้ [2]

1. ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางและวัสดุกรุพื้นถนน สามารถใช้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวมผสมกับยางมะตอยราดปูพื้นทางได้ ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีสมบัติหลายประการที่จะใช้เป็นมวลรวมได้ สมบัติบางประการเหนือกว่ามวลรวมจากวัสดุธรรมชาติอีกด้วย เช่น มีความแข็งและความต้านทานการขัดสีค่อนข้างสูงกว่า ความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุธรรมชาติจึงแข็งแรง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงทำให้ไม่ลื่นไหล อีกทั้งสามารถเก็บความร้อนได้ดีทาให้ส่วนผสมยางมะตอยอุ่นอยู่ได้นาน ทำให้การเทราดและปรับระดับพื้นถนนง่ายขึ้น การนำไปใช้งานลักษณะนี้จัดว่าเป็น Best available practice ขั้นตอนการเตรียมตะกรันสำหรับงานก่อสร้าง

2. ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเม็ดปูน โดยการผสมในเตาเผาปูนร่วมกับส่วนผสมอื่น ๆ ในบางกรณีสามารถใช้งานแทน Portland cement ได้เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีส่วนผสมทางเคมีค่อนข้างใกล้เคียงกัน

3. ใช้เป็นวัสดุดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้เป็น Carbonated block ตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็กมีแนวโน้มที่จะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เนื่องจากมีหินปูนอิสระอยู่มาก ตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็กถูกอัดกันอย่างหลวม ๆ มีความพรุนตัวประมาณร้อยละ 20-40 แล้วให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไหลผ่านที่ผิวจะเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ที่ผิวได้ประมาณร้อยละ 1-7 โดยน้ำหนัก กลายเป็นสารประกอบคาร์บอเนต กระบวนการนี้เรียกว่า Carbonation หรือ 13

Sequestration ซึ่งสามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้ทางอ้อม ส่วนของตะกรันที่ดูดซับก๊าซไว้เรียบร้อยแล้วสามารถใช้ทำเป็น Carbonated block ใช้เป็นเรือนเพาะเลี้ยงสาหร่ายทะเลและเป็นสถานที่อนุบาลสัตว์น้ำ

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็กกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการหลอมเหล็กอีกวิธีหนึ่ง โดยวิธีการนี้คิดค้นโดยบริษัท Tec hint Technology ประเทศอิตาลีในปี 2001 และได้ขยายขอบเขตการใช้งานในลักษณะดังกล่าวในระดับอุตสาหกรรมในปี 2003 โดยเน้นการนำเอาตะกรันในเตาอุ่นน้ำเหล็กผสมกับของเสียอื่น ๆ ที่เกิดจากการหลอม ไม่ว่าจะเป็นอิฐทนไฟที่บุเตาอุ่นน้ำเหล็กและ Tundish ฝุ่นผงต่าง ๆ มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของตะกรันในเตาอุ่นน้ำเหล็กกว่าร้อยละ 85 โดยน้ำหนักใช้เป็นฟลักซ์แทนปูนขาวฉีดพ่นเข้าไปในเตาอาร์คไฟฟ้า จุดเด่นของการใช้ฟลักซ์ที่เตรียมจากกากของเสียต่าง ๆ นี้คือ (1) สามารถลดปริมาณเหล็กที่ติดมากับตะกรันได้ (2) อิฐที่ใช้บุเตาอุ่นน้ำเหล็กเป็นอิฐชนิดแมกนีเซีย-คาร์บอนซึ่งเป็นชนิดเดียวกับอิฐทนไฟที่ใช้ในเตาอาร์คไฟฟ้า ฟลักซ์ตัวนี้จึงมีปริมาณของแมกนีเซียมค่อนข้างสูงจึงเป็นการลดโอกาสการกัดกร่อนของอิฐในเตาอาร์คไฟฟ้า ทำให้อายุการใช้งานของอิฐยาวนานขึ้นและ (3) ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกรันที่ส่งเสริมการเกิดฟองอากาศในชั้นตะกรันหรือ Slag foaming เพิ่มความหนาของชั้นตะกรัน ช่วยลดการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กได้

2.7 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีตที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับงานที่หลากหลาย โดยเฉพาะด้านความแข็งแรง ความทนทาน ความสวยงามและการใช้งานเฉพาะด้าน คุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทาปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ การปรับส่วนประกอบของวัตถุดิบจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์จะมีขั้นตอนต่าง ๆ ประกอบด้วย การบดวัตถุดิบต่าง ๆ ให้ละเอียด แล้วนำมาผสมในอัตราส่วนที่พอเหมาะ หลังจากนั้นป้อนเข้าเตาเผา วัตถุดิบเมื่อถูกความร้อนที่สูงพอจะหลอมตัวเป็นปูนเม็ด (Clinker) ปูนเม็ดจะถูกลดอุณหภูมิ และนำไปบดละเอียดร่วมกับยิปซั่ม (Gypsum) ผลที่ได้คือปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทำคอนกรีตบล็อกที่กำหนดไว้ในมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2530 [5] ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ผสม

ภาพที่ 2 ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา

ที่มา: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1. ม.ป.ป. : ออนไลน์.

2.7.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบทำให้สามารถปรับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่าง ๆ มาตรฐานการทดสอบวัสดุตาม ASTM C150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้ [7]

1) ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary Portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้กันมากในงานคอนกรีต ประมาณได้ว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ที่ผลิตในสหรัฐอเมริกาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป เช่น เสาคาน ฐานรากของอาคาร ถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนักและให้ความร้อนปานกลาง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว ตราทีพีไอสีแดง ตราภูเขา ตราดาวเทียม และตราเอกซีเมนต์สีน้ำเงิน เป็นต้น

2) ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลง (Modified cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 แต่สูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (ประเภทที่ 4) และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายได้ปานกลาง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีใช้ค่อนข้างน้อยในประเทศไทย ที่มีอยู่ได้แก่ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

3) ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมี

ปริมาณ C3S (ไตรแคลเซียมซิลิเกต) สูงและความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากเหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็ว เช่น งานซ่อมแซม หรืองานที่ต้องการถอดแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต เสาไฟฟ้าคอนกรีต ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ เช่นปูนซีเมนต์ตราช้างรับกาลังอัดเร็ว เป็นต้น

4) ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา (Mass Concrete) เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนประเภทนี้ ปัจจุบันปูนประเภทนี้ถูกทดแทนโดยการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับ Pulverized Fuel Ash และ Grong Granular Blast Furnace Slag (GGBS) ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในเรื่องวัสดุใหม่ในงานก่อสร้าง

5) ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resisting Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีปริมาณของ C_3A ต่ำมาก โดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 5 เพราะ C_3A (ไตรแคลเซียมอลูมิเนต) จะทาให้เกิดการรวมตัวกับซัลเฟตได้ง่ายดังนั้นเมื่อ C_3A (ไตรแคลเซียมอลูมิเนต) มีปริมาณน้อยจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลย ทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตลดลง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต เช่น โครงสร้างในทะเล ริมทะเล ท่าเรือ หรือบริเวณที่มีดินเค็ม ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ เช่น ปูนซีเมนต์ตราช้างทนซัลเฟตสูง ปูนซีเมนต์ตราทีพีไอ สีฟ้า เป็นต้น

2.7.2 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์เป็นสิ่งสำคัญที่ควรศึกษาเพื่อให้สามารถเข้าใจถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์และเลือกใช้ปูนซีเมนต์ได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับงานซึ่งออกไซด์หลัก (Major Oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์ทั้ง 4 ชนิดนี้ รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor Oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์อัลคาไล (Na_2O และ K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 [8]

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	60.0-67.0
SiO_2	17.0-25.0
Al_2O_3	3.0-8.0
Fe_2O_3	0.5-6.0
MgO	0.1-4.0
Na_2O	0.1-1.8
K_2O	0.1-1.8
SO_3	0.5-3.0
สารประกอบอื่น ๆ	0.5-3.0
การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI)	0.1-3.0
การที่ไม่ละลายในกรดและด่าง	0.20-0.75

ที่มา: คอนกรีตเทคโนโลยี 2/59 ปูนซีเมนต์. 10 มกราคม 2558 : ออนไลน์.

2.7.3 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันดังต่อไปนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1.1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดามีคุณสมบัติคือ แรงที่เกิดขึ้นจะสม่ำเสมอแรงจะมากขึ้นหรือน้อยลงตามสัดส่วนของน้ำและปูนซีเมนต์ที่ผสมในคอนกรีต

1.2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง มีคุณสมบัติคือเมื่อผสมกับน้ำจะคายความร้อนออกมาน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา และมีความต้านทานต่อสารที่เป็นด่างได้

1.3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดแข็งตัวเร็ว มีคุณสมบัติคือเนื้อปูนมีความละเอียดทำให้คอนกรีตแข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง

1.4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเกิดความร้อนต่ำ เป็นปูนซีเมนต์ที่ผลิตพิเศษในเชิงเคมี มีคุณสมบัติคือ เกิดความร้อนขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อผสมเป็นคอนกรีต

1.5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่มีความต้านทานต่อซัลเฟตสูงมีคุณสมบัติคือเมื่อผสมเป็นคอนกรีตจะมีความแกร่งไม่สึกกร่อนหรือสลายตัวเมื่ออยู่ในน้ำเค็มพอสมควรความยืดหดของปูนซีเมนต์มีน้อย

2) ปูนซีเมนต์ขาว มีคุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มีสีขาว

3) ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ จะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ตามวัตถุประสงค์ที่ผลิตออกเพื่อใช้ในงานแต่ละประเภท

4) ปูนซีเมนต์ผสม ปูนซีเมนต์ผสมหรือปูนซีเมนต์ซิลิกาได้จากการบดปูนเม็ดกับวัสดุเฉื่อยจาพวกทราย ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกา หรือบดร่วมกับหินปูนที่เฉื่อยต่อการทาปฏิกิริยา ปริมาณวัสดุเฉื่อยที่ใช้ประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนักทำให้ปูนซีเมนต์มีราคาถูกลง ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น การเยิ้มน้ำต่างและการหดตัวเมื่อแห้งน้อยลง จึงช่วยลดการแตกร้าวที่ผิว เหมาะสำหรับใช้ในงานปูนก่อหรือปูนฉาบเพราะจะได้มีเวลาในการทำงานนานขึ้นแต่ข้อควรระวังสำหรับปูนซีเมนต์ประเภทนี้ คือ มีกำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุต้น ๆ จึงไม่ควรใช้ในการก่อสร้างองค์อาคารหลัก เช่น พวกเสา คานพื้น หรือฐานรากของอาคาร นอกจากนี้อายุการใช้งานของอาคารจะน้อยกว่าที่ควรจะเป็นเพราะมีเนื้อปูนน้อยกว่าปกติปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่ผลิตจำหน่ายในประเทศไทย เช่น ปูนตราเสือ ปูนตราทีพีไอ สีเขียวเป็นต้น

2.7.4 มวลผสมคอนกรีต

หินย่อย กรวด และทราย ที่ใช้ในงานก่อสร้าง รวมเรียกว่า วัสดุผสม (Aggregates) ซึ่งเป็นพวกแร่ธาตุเฉื่อย (inert materials) ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสท์ วัสดุผสมอาจได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หินอัคนี หินชั้นและหินแปร หรือทำเทียมขึ้นเช่นวัสดุผสมตะกรันเตาถลุง ซึ่งเป็นกากหรือตะกรันที่ได้จากการหล่อโลหะแล้วนำมาบดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ วัสดุผสมอาจเรียกว่าเป็น ตัวแทรก (Filler Material) ในเนื้อคอนกรีตก็ได้เพราะในเนื้อคอนกรีตมีหิน ทราย ผสมอยู่เป็นส่วนใหญ่ ประมาณสามในสี่ส่วน และโดยที่ราคาของวัสดุผสมถูกกว่าของปูนซีเมนต์ ดังนั้นวัสดุผสมจึงมีส่วนทำให้ได้คอนกรีตราคาถูก

2.7.5 มวลผสมละเอียด

หมายถึง ทรายซึ่งเป็นวัสดุผสมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ทั้งนี้ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มม. มวลผสมที่เล็กกว่านี้ เรียกกว่า ฝุ่น (Silt หรือ Clay) ทราย ปกติเป็นหินชั้นเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยการแปรรูปหรือกะเทาะแบ่งส่วนมาจากหินและกรวด เช่น ถูกกระแสน้ำในลำธารแม่น้ำพัดพาไหลสลับกลับไปกลับมาจนแตกละเอียดเป็นผงและมีขนาดต่างกัน ทรายที่เกิดเองบนบกที่ขุดได้บนพื้นดิน เรียกกว่า “ทรายบก” ที่เกิดจากลำธารแม่น้ำ เรียกกว่า“ทรายแม่น้ำ” ที่เกิดจากทะเลเรียกว่า “ทรายน้ำเค็ม”เม็ดเล็กขนาด 0.5-1.5 มม. ใช้ในงานปูนก่อ ปูนฉาบ ทรายเม็ดกลาง ขนาด 1-2 และ 3 มม. ใช้ในงานเทคอนกรีตปูนก่อที่ต้องรับแรง ปูนฉาบผนังใต้ดินพื้น คานและงานคอนกรีตทั่วไป ทรายหยาบเม็ดใหญ่ ขนาด 2-4 มม. ใช้งานคอนกรีตเทพื้น ฐานราก ฯลฯ และในที่ที่ต้องการให้รับแรงอัดมาก ๆ มวลผสมหยาบ เป็น

วัสดุที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือหินโม่หินย่อยที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น ใช้ทำคอนกรีต ทำถนน ส่วนมากระเบิดเอามาจากภูเขา หินที่ระเบิดออกมา มีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 38 x 50 ซม. แล้วจึงนำมาย่อยด้วยเครื่องย่อยหินอีกทีหนึ่ง แหล่งผลิตหินในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดสระบุรี ลพบุรี ราชบุรี ซึ่งหินย่อยที่ได้ส่วนใหญ่เป็นหินปูน

ภาพที่ 3 ทรายหยาบ

2.7.6 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)

การหดตัวแบบแห้งจะเกิดขึ้นในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วและอยู่ในสภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตที่บริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียความชื้นภายในช่องว่างคาปิลลารี (Capillary Pore) และเกิดการหดตัวแตกร้าว การหดตัวของคอนกรีตโดยทั่วไปเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ กลไกของการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง จะเกิดขึ้นในคอนกรีตบริเวณที่ผิวสัมผัสกับอากาศมีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องว่างคาปิลลารีมาก เนื่องมาจากการสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) โดยการระเหยไปกับอากาศ ทำให้เกิดแรงดึงเกิดขึ้นในช่องว่างคาปิลลารีสูงขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง คือ การสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีตไปสู่บรรยากาศแวดล้อม ดังนั้นหากป้องกันการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีตจะทำให้ลดปัญหากาแตกร้าวของคอนกรีตลงได้ เช่น การออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ และการบ่มคอนกรีตให้ถูกวิธี เป็นต้น

2.8 คอนกรีตผสมเสร็จ

2.8.1 คอนกรีตคืออะไร

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจวบจนปัจจุบัน คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำ และน้ำยาผสม

คอนกรีต ผสมกับวัสดุผสมอันได้แก่ ทราย หินหรือกรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

2.8.2 คอนกรีตผสมเสร็จ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันมานาน ในอดีตการที่จะใช้คอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างนั้น ผู้รับเหมาจะต้องเริ่มจาก การสั่งซื้อ หิน ทราย ปูนซีเมนต์ และน้ำยาผสมคอนกรีต จากนั้นจะต้องจัดการหาเครื่องผสมและทีมงาน แต่ในปัจจุบันคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งคือ คอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อยจากโรงงาน และลำเลียงใส่รถเพื่อจัดส่งให้หน่วยงานก่อสร้าง ได้เข้ามาทดแทนการใช้คอนกรีตผสมโม่เล็กด้วยเหตุผลที่สำคัญคือ เวลาและสถานที่ในการก่อสร้างจำกัด

1) เวลาและสถานที่ในการก่อสร้างจำกัด

2) แรงงานหายาก

3) การก่อสร้างต้องการคอนกรีตที่มีคุณภาพสูง

2.8.3 คอนกรีตผสมเสร็จคืออะไร

คอนกรีตผสมเสร็จ คือ ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีตที่ผสมกันเบ็ดเสร็จจากโรงงาน ซึ่งตั้งอยู่นอกหรือในหน่วยงานก่อสร้าง รวมถึงบริการจัดส่งไป ณ หน่วยงานก่อสร้างโดยรถผสมคอนกรีต ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ธุรกิจคอนกรีตผสมเสร็จเป็นทั้งการขายผลิตภัณฑ์ และการขายบริการ จะพบว่า ผู้ควบคุมงานให้ความสนใจในคุณภาพคอนกรีตเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ผู้รับเหมาให้ความสนใจในเรื่องการบริการและราคาที่เหมาะสม

1) ขบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่ได้มาตรฐานจะเริ่มจากการตรวจสอบคุณสมบัติของส่วนผสมต่าง ๆ อันได้แก่ หิน ทราย ที่ได้เลือกจากแหล่งที่มีคุณภาพดีมีส่วนคละถูกต้องตามมาตรฐานมาจัดกองเก็บไม่ให้ผสมกัน ส่วนปูนซีเมนต์จะถูกบรรจุไว้ในไซโลอย่างมิดชิด และน้ำยาผสมคอนกรีตจะถูกบรรจุในภาชนะเฉพาะอย่างมิดชิดเช่นกัน วัตถุดิบดังกล่าวจะถูกลำเลียงสู่ขบวนการผลิตต่อไป

2) ขบวนการผลิตเริ่มจาก การลำเลียงหิน ทราย ปูน ซีเมนต์ ผ่านเครื่องชั่งให้ได้น้ำหนักถูกต้องที่ออกแบบไว้ แล้วนำเข้าผสมกันในเครื่องผสมคอนกรีต ซึ่งจะผสมคอนกรีตตามเวลาที่กำหนดด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติที่ให้ความเที่ยงตรง สม่ำเสมอและรวดเร็ว คอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะถูกลำเลียงลงสู่รถผสมคอนกรีตเพื่อนำไปส่งยังหน่วยงานก่อสร้างต่าง ๆ

3) คุณลักษะเด่นของคอนกรีตผสมเสร็จ

3.1) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมีคุณภาพตรงตามมาตรฐานงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไป

3.2) มีการควบคุมสัดส่วนผสมของคอนกรีตด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก ทำให้ได้ส่วนผสมคอนกรีตที่ถูกต้อง แน่นอนและสม่ำเสมอ

3.3) โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จได้รับการพัฒนาจากความก้าวหน้าทาง เทคโนโลยีอยู่เสมอ และสามารถผลิตคอนกรีตได้ตั้งแต่ 30-150 ลบ.ม./ชม. ซึ่งสามารถช่วยให้งานเทคอนกรีตดำเนินไปได้อย่างรวดเสร็จ

3.4) แก้ปัญหางานก่อสร้างที่มีบริเวณก่อสร้างจำกัด ไม่สามารถที่จะกองเก็บหิน ทราย หรือ ในงานก่อสร้างที่จะต้องเปลี่ยนสถานที่ที่เทคอนกรีตตลอดเวลา เช่น งานถนน งานคลองส่งน้ำ เป็นต้น

3.5) แก้ปัญหางานก่อสร้างที่ต้องการใช้คอนกรีตปริมาณครั้งละไม่มากนัก หรืองานที่ต้องการใช้คอนกรีตเป็นระยะห่าง ๆ กัน ซึ่งไม่คุ้มกับการลงทุนซื้อวัสดุผสมมาเก็บไว้ใช้งานเอง

3.6) ในงานก่อสร้างที่อัตราการเทคอนกรีตค่อนข้างช้าสามารถแก้ไขได้โดยเติมน้ำยาผสมคอนกรีตที่มีคุณลักษณะยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

3.7) โดยปกติคอนกรีตผสมเสร็จจะมีราคาแพงกว่า คอนกรีตผสมเองอยู่บ้างเล็กน้อย แต่ก็สามารถทดแทนด้วยคุณภาพของคอนกรีตที่ดีและสม่ำเสมอ และที่สำคัญมากคือ ประหยัดเวลาในการก่อสร้าง

2.8.4 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีตเป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกจากคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเร็วเกินไป เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง ดังนั้น หลังจากที่ผิวหน้าคอนกรีตแข็งตัวแล้ว จะต้องบ่มคอนกรีตให้มีความชื้นอยู่เสมอ เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน กำลังของคอนกรีตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตราบเท่าที่ยังมีความชื้นให้ปูนซีเมนต์ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ [5]

ภาพที่ 4 การบ่มคอนกรีตในงานสร้างสะพาน

ที่มา: การบ่มคอนกรีต (Concrete Curing). 21 May 2010 : ออนไลน์.

วิธีการบ่มคอนกรีต วิธีการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับสภาพของงานคอนกรีตนั้น ๆ เป็นหลัก ลักษณะของการบ่มคอนกรีตสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ

1) การบ่มโดยการเพิ่มความชื้นให้คอนกรีต การบ่มลักษณะนี้จะเพิ่มความชื้นให้กับผิวคอนกรีตโดยตรง เพื่อทดแทนการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีต การบ่มลักษณะนี้สามารถทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

1.1) การขังหรือหล่อน้ำ เป็นการทำนบกั้นน้ำไม่ให้น้ำไหลออกมักจะใช้กับงานทางระดับ เช่น พื้น หรือถนน เป็นต้น ข้อควรระวังสำหรับวิธีนี้ คือ ต้องระวังอย่าให้ทำนบกั้นน้ำพัง และหลังจากบ่มเสร็จแล้ว อาจจะต้องทำความสะอาดผิวหน้าคอนกรีต

1.2) การฉีดน้ำหรือรดน้ำ เป็นการฉีดน้ำให้ผิวคอนกรีตเปียกอยู่เสมอวิธีนี้ใช้ได้กับงานคอนกรีต ทั้งในแนวดิ่ง แนวระดับ หรือแนวเอียง ข้อควรระวัง คือต้องฉีดน้ำให้ทั่วถึงทุกส่วนของคอนกรีต และแรงดันน้ำต้องไม่แรงเกินไปจนชะเอาผิวหน้าคอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัวดีดออก

1.3) การคลุมด้วยวัสดุเปียกชื้น เป็นวิธีที่ใช้กันมาก เพราะสะดวก ประหยัด และสามารถใช้ได้กับงานทั้งแนวระดับแนวดิ่งและแนวเอียง วัสดุที่ใช้คลุมอาจจะใช้ผ้าใบกระสอบหรือวัสดุอื่นที่อมน้ำ ข้อควรระวัง คือวัสดุที่คลุมต้องเปียกชุ่มอยู่เสมอการคลุมต้องคลุมให้วัสดุคลุมเหลื่อมกัน วัสดุที่ใช้คลุมต้องปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต

2) การบ่มโดยการป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต วิธีการนี้ใช้ เพื่อป้องกันมิให้ความชื้นจากคอนกรีตระเหยออกจากเนื้อคอนกรีต การบ่มลักษณะนี้สามารถกระทำได้หลายวิธีดังนี้

2.1) การบ่มในแบบหล่อ แบบหล่อไม้ที่เปียก และแบบหล่อเหล็ก สามารถป้องกันการสูญเสียความชื้นได้ดี วิธีนี้จัดได้ว่าง่ายที่สุด เพียงแค่ทิ้งแบบหล่อให้อยู่กับคอนกรีตที่หล่อไว้ให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้ และคอยดูแลให้ผิวด้านบนคอนกรีตมีน้ำอยู่

2.2) การใช้กระดาษกันน้ำซึม เป็นการใช้กระดาษกันน้ำซึม ปิดทับผิวคอนกรีตให้สนิท เป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน วิธีนี้มักนิยมใช้กับงานคอนกรีตแนวระดับ กระดาษกันน้ำซึมนี้ ข้อควรระวังในการใช้กระดาษ คือ บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นจะต้องผนึกให้แน่นด้วยกาว หรือเทป และกระดาษต้องไม่มีร่อยรอยฉีกขาดหรือชำรุด

2.3) การใช้แผ่นผ้าพลาสติกคลุม วิธีการนี้จะเหมือนกับการใช้กระดาษกันน้ำ แต่แผ่นผ้าพลาสติกจะเบากว่ามาก จึงสะดวกในการใช้มากกว่า สามารถใช้กับงานโครงสร้างทุกชนิด ข้อควรระวังก็เช่นเดียวกับกระดาษกันน้ำ

2.4) การใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต เป็นการพ่นสารเคมีลงบนผิวคอนกรีตซึ่งสารเคมีที่พ่นนี้จะกลายเป็นเยื่อบาง ๆ คลุมผิวคอนกรีตป้องกันการระเหยออกของน้ำในคอนกรีต ข้อที่ควรทราบ

คือสารเคมีประเภทนี้จะทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเดิมกับคอนกรีตที่จะเทใหม่เสียไปจึงไม่ควรใช้กับงานคอนกรีตที่ต้องต่อเติมหรือฉาบปูนในภายหลังและหากใช้สารเคมีฉีดพ่นแล้ว

3) การบ่มด้วยการเร่งกำลัง เป็นการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำ โดยให้ความชื้น และความร้อนกับคอนกรีตที่หล่อเสร็จใหม่ ๆ วิธีนี้จะทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นโดยรวดเร็วช่วยลดการหดตัว และเพิ่มความต้านทานต่อสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต การบ่มด้วยการเร่งกำลัง นิยมใช้กันในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูป

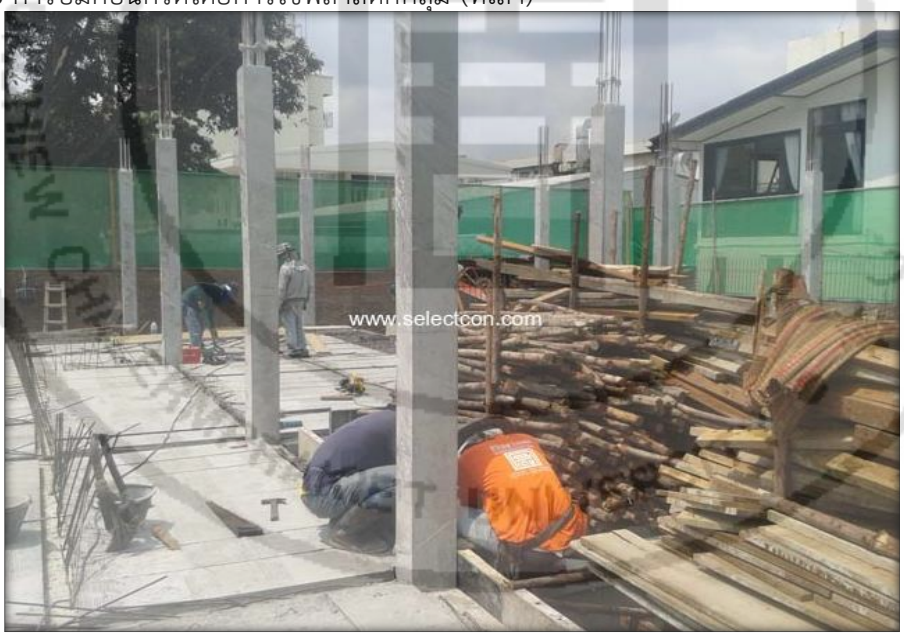
ภาพที่ 5 การบ่มคอนกรีตโดยการขังน้ำ 7 วัน

ภาพที่ 6 การบ่มคอนกรีตโดยใช้กระสอบคลุม รดน้ำให้ชุ่มตลอด 7 วัน

ที่มา: การบ่มคอนกรีต. 21 May 2010 : ออนไลน์.

ภาพที่ 7 การบ่มคอนกรีตโดยการใช้น้ำยาบ่ม

ภาพที่ 8 การบ่มคอนกรีตโดยการใช้พลาสติกคลุม (ที่เสา)



ที่มา: การบ่มคอนกรีต. 21 May 2010 : ออนไลน์.

2.9 การทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)

โดยใช้วิธีการทดสอบหาค่าการยุบตัวเพื่อตรวจสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีต (Workability) ค่ายุบตัวไม่ได้เป็นค่าที่วัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตโดยตรง แต่เป็นการวัดความข้นเหลวของคอนกรีต (Consistency) หรือลักษณะการไหลตัวของคอนกรีต (Flow Characteristic) แม้วิธีนี้จะ

ไม่เหมาะสมสำหรับทดสอบคอนกรีตที่เหลว หรือแห้งมากแต่ก็มีประโยชน์อย่างมากและสะดวกสำหรับการควบคุมความสม่ำเสมอของการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ เช่น ในกรณีที่ค่ายุบตัวของคอนกรีตมีค่ามากกว่าปกติที่ออกแบบไว้ แสดงให้เห็นว่าจะต้องมีความผิดปกติเกิดขึ้นในสัดส่วนผสม ขนาดคละหรือความชื้นในมวลรวมซึ่งจะช่วยให้ผู้ผลิตคอนกรีตสามารถตรวจสอบและแก้ไขได้ [10]

การทดสอบทำโดยตักคอนกรีตใส่ลงในโคนที่มีลักษณะเป็นกรวยยอดตัดให้ได้ 3 ชั้น โดยให้แต่ละชั้นมีปริมาตรเท่ากัน และต้องตำด้วยเหล็กตำทีละชั้นแล้วจึงค่อย ๆ ยกโคนขึ้นอย่างช้า ๆ คอนกรีตจะยุบตัวลงด้วยน้ำหนักของตัวเอง ความสูงที่ยุบตัวลงของคอนกรีตที่วัดได้ถือว่าเป็นค่ายุบตัวของคอนกรีต (ควรใช้เวลาในการทดสอบทั้งหมดไม่เกิน 2:30 นาที

2.9.1 ค่ายุบตัวที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างในประเทศไทย

1) คอนกรีตสำหรับงานพื้นถนนสนามบิน ค่ายุบตัวที่เหมาะสม 5.0 ซม. ± 2.5

2) คอนกรีตสำหรับงานทั่วไป ค่ายุบตัวที่เหมาะสม 7.5 ซม. ± 2.5

3) คอนกรีตสำหรับงานฐานราก ค่ายุบตัวที่เหมาะสม 10.0 ซม. ± 2.5

4) คอนกรีตสำหรับงานคอนกรีตปั๊ม ค่ายุบตัวที่เหมาะสม 10.0 ซม. ± 2.5

5) คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะเล็ก ค่ายุบตัวที่เหมาะสม 10.0 ซม. ± 2.5

6) คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะใหญ่มากกว่า 15 ซม.

7) คอนกรีตสำหรับงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ หรืองานที่มีเหล็กเสริมหนาแน่นมากกว่า 15 ซม.

ภาพที่ 9 การทดสอบค่าการยุบตัว

ที่มา: คอนกรีต เทคโนโลยี-มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2554 : ออนไลน์.

2.9.2 รูปแบบการยุบตัวของคอนกรีตโดยทั่วไปมี 3 แบบ

1) การยุบตัวแบบถูกต้อง (True Slump) เป็นการยุบตัวของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักของคอนกรีตเอง

2) การยุบตัวแบบเฉือน (Shear Slump) เป็นการยุบตัวแบบเฉือนซึ่งเป็นการยุบตัวที่เกิดจากการเลื่อนไถลของคอนกรีตส่วนบน ในลักษณะเฉือนลงไปด้านข้าง

3) การยุบตัวแบบล้ม (Collapse Slump) เป็นการยุบตัวที่เกิดจากคอนกรีตที่มีความเหลวมาก ถ้าหากคอนกรีตมีการยุบตัวแบบเฉือน หรือแยกตัวเพราะเหลวมากเกินไป ถ้าหากพังลง 2 ครั้งติดต่อกัน แสดงว่า Slump Test อาจไม่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตนี้ มาตรฐานทั่วไปกำหนดให้ค่าค่าที่ยอมรับได้ คือ 7.5 ± 2.5 เซนติเมตร หรือ 5 -10 เซนติเมตร

ภาพที่ 10 รูปแบบการยุบตัวของคอนกรีต

ที่มา: คอนกรีต เทคโนโลยี-มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2554 : ออนไลน์.

2.10 การทดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength test)

กำลังต้านทานแรงหรือการรับแรง เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีต ซึ่งมีอยู่หลายอย่างด้วยกัน เช่น กำลังต้านทานแรงอัดเป็นต้น งานคอนกรีตทั่วไปนิยมทำการทดสอบหากำลังยืดเหนี่ยวและกำลังต้านทานแรงอัด เป็นต้น งานคอนกรีตทั่วไปนิยมทำการทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดเป็นหลักเพื่อนำผลไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของงานและยังใช้เป็นตัวบ่งบอกให้ทราบถึงคุณสมบัติด้านอื่นได้เป็นอย่างดี

การทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตทำได้โดยการกดหรืออัด จนกระทั่งก้อนตัวอย่างแตก แล้วทำการคำนวณหาค่าความต้านทานแรงอัดประลัย มีหน่วยเป็น กก/ตร.ซม. หรือ ปอนด์/ตร.นิ้ว

2.10.1 ก้อนตัวอย่างมาตรฐานที่ทำเพื่อทดสอบกำลังอัดที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายมี 2 รูปทรง

1) รูปทรงกระบอก เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกา ขนาดที่ใช้คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

2) รูปทรงลูกบาศก์ เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษขนาดที่ใช้คือขนาด 15x15x15 ซม. กำลังอัดของ 2 รูปทรงนี้จะแตกต่างกัน ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมของคอนกรีตเดียวกัน โดยกำลังอัดด้วยตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบ

2.1) แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกดก่อให้เกิด Confining Stress ซึ่งจะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของรูปทรงลูกบาศก์ที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง

2.2) องค์ประกอบเรื่องความชะรูด กล่าวคือเนื่องจากรูปทรงกระบอกมีความสูงมากกว่าด้านกว้างทำให้ผลด้าน Confining Stress ลดลงอย่างมากตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (มาตรฐาน วสท.)

2.10.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง

1) คุณสมบัติของวัสดุผสม

1.1) ปูนซีเมนต์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ คือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

1.2) มวลรวม มวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์ อย่างไรก็ดีมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อย ซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก สำหรับคอนกรีตความสามารถเทได้เท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน

1.3) น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ ในส่วนของกำลังของคอนกรีตจะต่ำลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

2.10.3 การทำคอนกรีต

1) การชั่งตวงส่วนผสม หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งอัตราส่วนผสมจะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรงโดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2) การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะหากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะลำเลียง หรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้

2.10.4 การบ่มคอนกรีต

1) ความชื้นจะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเป็นอย่างมาก เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

2) อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะบ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

3) เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าสามารถบ่มคอนกรีตมีให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้ยิ่งนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และการที่กำลังอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด คือได้ค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดนี้ อาจมีสาเหตุมาจากหลาย ๆ ประการซึ่ง ได้แก่

3.1) ใช้สัดส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม

3.2) ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ

3.3) ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดี

3.4) การผสมไม่ดีพอ

3.5) มีสารอินทรีย์ต่าง ๆ มาเกินข้อกำหนด

3.6) ใช้หินทรายที่สกปรก

3.7) ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ

3.8) ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม

3.9) การอัดแน่นไม่ถูกต้อง

3.10) การบ่มไม่เพียงพอ

3.11) การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง

3.12) อุณหภูมิผันแปรไป

2.10.5 ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างคอนกรีต

ลักษณะการชำรุดแตกหักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่รับแรงอัด มักแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ (Shear Failure) โดยมีปลายกรวยอยู่ที่กึ่งกลางของทรงกระบอก เกิดจากการถูกเฉือนในระนาบที่เอียงกับแรงกด ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างอาจเป็นการแตกแบบแยกออก (Splitting Failure)

2.10.6 ทดสอบความเป็นของเสียอันตรายของตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็ก (LFS)

นำกากตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็กมาตรวจวิเคราะห์โลหะหนัก ได้แก่ As, Cd, Cr, Pb, Hg, Ni, และ Zn แล้วนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (ตารางที่ 4) [4]

ตารางที่ 4 วิธีการตรวจวิเคราะห์โลหะหนัก

ลำดับ	พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวิเคราะห์
1	As	Atomic Absorption, Furnace Technique
2	Cd	Atomic Absorption, Direct Aspiration
3	Cr	Colorimetric (Discrete-FIA)
4	Pb	Atomic Absorption, Furnace Technique
5	Hg	Manual Cold-Vapor Technique (CVAA)
6	Ni	Atomic Absorption, Furnace Technique
7	Zn	Atomic Absorption, Furnace Technique

หมายเหตุ: ND = ไม่พบ (Not detected)

ที่มา: รายงาน EIA of GJS. มกราคม-มิถุนายน 2558 : 105.[(4)]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาโครงงานเรื่องการศึกษาศักยภาพการนาตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็กกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่จากกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนนี้ ได้มีการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อหลักของโครงการดังนี้

ชูโชค ศิวะคุณากร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (วิทยานิพนธ์ 2536) [11] ได้ทำการศึกษาคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ใช้ส่วนผสมของเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยค่ายุบตัวและกำลังคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินและไม่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสม นอกจากนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตคอนกรีตกำลังอัดสูงที่มีเถ้าถ่านหินจากฮ่องกงเป็นส่วนผสมและคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมเพื่อหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยใช้ส่วนผสมปูนซีเมนต์ 450,

500 และ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.22, 0.24, 0.26, 0.28 และ 0.30 ตามลำดับ สำหรับการหาอัตราส่วนทรายต่อมวลรวมร้อยละ 25, 30, 35, 40 และ 45 เพื่อหาค่ากำลังอัดคอนกรีตที่สูงสุดในการหาค่ายุบตัวและค่าการรับกำลังอัดคอนกรีตได้นำค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และค่าทรายต่อมวลรวมที่ทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ค้นพบจากการทดลองมาใช้ออกแบบส่วนผสมโดยใช้ปูนซีเมนต์ 450, 500 และ 550 กก./ลบ.ม. แล้วเปลี่ยนแปลงปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง โดยใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 หลังจากผสมคอนกรีตทำการวัดค่าการยุบตัวของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมแล้วทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ ขนาด 10x10x10 ซม. ของแต่ละส่วนผสมจำนวน 15 ตัวอย่าง หลังจากนั้นนำมาทดสอบหาค่ากำลังอัดคอนกรีตเมื่ออายุครบ 3, 7, 28, 56 และ 91 วัน ผลที่ได้พบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนทรายต่อมวลรวมให้ค่ากลังอัดสูงสุดเท่ากับ 0.26 และ 0.40 ตามลำดับ ค่ากายุบตัวของคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 22.3 ซม.ในขณะที่คอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมมีค่าเฉลี่ย 14.7 ซม. อย่างไรก็ตามพบว่าคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 มีค่ายุบตัวเพียง 11 เซนติเมตร สำหรับการวัดค่ากำลังอัดคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม 400, 500 และ 550 กก./ลบ.ม. และมีเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ที่อายุคอนกรีต 91 วัน ให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตอยู่ในช่วง 760-850 กก./ตร. ซม. สำหรับต้นทุนในการผลิตคอนกรีตกำลังอัดสูงพบว่าคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะมีต้นทุนสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมแต่คุณสมบัติของคอนกรีตที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวที่สูงขึ้นและคอนกรีตไม่เกิดการแยกตัวทำให้คุ้มค่าต่อการลงทุน

ปริญญา คูณมี, วัชร ส่งเสริม และธีรเดช วุฒิพรพันธ์ [12] ได้ทำการศึกษาตะกรันเหล็กที่ถูกจัดเป็นของเสียอันตรายที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณตะกรันเหล็กที่เหมาะสมมาใช้แทนปูนซีเมนต์ ทราย และหินในการผลิตคอนกรีตที่สามารถรับแรงอัดได้ในช่วง 240-260 กก./ตร.ซม. เนื่องจากเป็นการศึกษาเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ใช้ตะกรันเหล็ก แทนปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ในสัดส่วนร้อยละ 10 โดย ปริมาตรเท่านั้น ผู้วิจัยได้ใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง และใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่า ในการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถใช้ตะกรันเหล็กแทนส่วนผสมอื่น ๆ ได้ถึง 207 กก. ซึ่งใช้ผสมแทน ปูนซีเมนต์ ทราย และหิน เท่ากับ 15.7 กก., 37.4 กก. และ 153.9 กก. ตามลำดับ โดยใช้เวลาบ่มคอนกรีตที่ 28 วัน คอนกรีตที่ได้จากส่วนผสมดังกล่าวจะรับกำลังอัดเฉลี่ยได้เท่ากับ 250 กก./ตร.ซม. ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายใน

การกำจัดตะกรันเหล็กได้ประมาณ 255 บาท และ ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตลงได้ร้อยละ 5 ผลิตคอนกรีต 1 ลบ.ม.

เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, อรรคเดช อับดุลมาติน วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล [13] ได้ใช้วัสดุเหลือทิ้ง 2 ชนิดเป็นวัสดุประสาน คือ เถ้าก้นเตาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทีลีนจากจังหวัดสมุทรสาคร โดยมุ่งเน้นพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำจากวัสดุทั้ง 2 ชนิด เพื่อเป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์ ตลอดจนใช้ปูนซีเมนต์เพื่อเร่งและพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 55 กก./ลบ.ม.) การศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสมสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึง 29.7 และ 36.8 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์ 55 กก./ลบ.ม. สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังอัด 44.3 และ 51.4 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัดประมาณ 47 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน ต้องใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมถึง 450 กก./ลบ.ม. แสดงให้เห็นถึงการใช้คอนกรีตที่ทำ จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดคอนกรีตสูงเป็นที่น่าพอใจในขณะที่สามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้จำนวนมากในส่วนผสมคอนกรีต

สุวัฒชัย และคณะ (2555) [14] การศึกษาพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2533 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการลดการนำความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารโดยการนำผักตบชวาบดละเอียดมาผสมกับส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกในสัดส่วนต่าง ๆ โดยแบ่งส่วนผสมออกเป็น 16 สูตร และกำหนดให้ส่วนผสมต้นแบบคือ ปูน : ทราย : หินฝุ่น 1 : 3 : 5 โดยน้ำหนัก ทำการอัดขึ้นรูปในเบื้องต้นเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ซม. เพื่อเปรียบเทียบหาสูตรที่มีความต้านแรงอัดผ่าน มอก.58-2533 และคัดเลือกนำไปผลิตรูปทรงจริงขนาด 70x190x390 มม. 12 สูตร ทำการทดสอบคุณสมบัติเปรียบเทียบหาสูตรที่มีคุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุดและมีคุณสมบัติในด้านความต้านแรงอัดและปริมาณความชื้นผ่านมาตรฐาน มอก.58-2533 พบว่าคอนกรีตบล็อกสูตร D3 โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่าง ปูน : ทราย : หิน : ผักตบ= 1 : 3 : 4.925 : 0.075 ให้ผลค่าสัมประสิทธิการนำความร้อน (k Value) ต่ำที่สุด 0.111 W/m·K ผลการทดสอบความต้านแรงอัดและปริมาณความชื้นพบว่ามีค่าความต้านแรงอัด 3.06 เมกะพาสคัลมีค่าปริมาณความชื้นโดยการหดตัวทางยาวร้อยละ 0.05 และการดูดกลืนน้ำ ร้อยละ 11.3 ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2533 ทั้งในด้านความต้านแรงอัดและปริมาณความชื้นจัดอยู่ในคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักประเภทที่ 1 คือ ประเภทควบคุมความชื้น มีค่าน้ำหนักต่อก้อน 6.04 กก. ผลการทดสอบการป้องกันความร้อนเมื่อนำคอนกรีตบล็อกสูตร D3 ไปก่อผนังกล่องทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการลด

ความร้อนเข้าสู่อาคารเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่มีขายในเชิงพาณิชย์ พบว่า อุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดลองเฉลี่ย 31.74 °C ต่ำกว่าคอนกรีตบล็อกยี่ห้อที่ 1 และ 2 ซึ่งมีอุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดลองเฉลี่ย 35.09 °C และ 32.47 °C ตามลาดับและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าราคาจากหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป

สุภิชาติ เจนจิระปัญญา และปิติศานต์ กร้ำมาตร (2559) [15] ได้ทำศึกษาการใช้ประโยชน์วัสดุกากอุตสาหกรรมเป็นสารปอซโซลาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 ของปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก โดยวัสดุกากอุตสาหกรรมที่ศึกษาคือเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตเบื้องต้น และคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต เพื่อสามารถนำวัสดุกากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดปัญหาในการกำจัดทิ้ง ผลการทดลองพบว่า วัสดุกากอุตสาหกรรมคือเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีศักยภาพในการแทนที่ปูนซีเมนต์คุณสมบัติด้านกำลังยังมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนในช่วงอายุต้น แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น เนื่องจากการเกิดของปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นจะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อผสมวัสดุกากอุตสาหกรรม ในส่วนผสมมีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าก้อนตัวอย่างที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน และมีการขยายตัวที่ต่ำในสารละลายซัลเฟต เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงและผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของตะกรันจากเตาอุ่นน้ำเหล็ก เพื่อนำมาใช้สำหรับจัดทำวัสดุรีไซเคิลในการทดลองนี้จึงมุ่งเน้นการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีในการดำเนินงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบ

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบส่วนผสมและทดสอบการยุบตัว

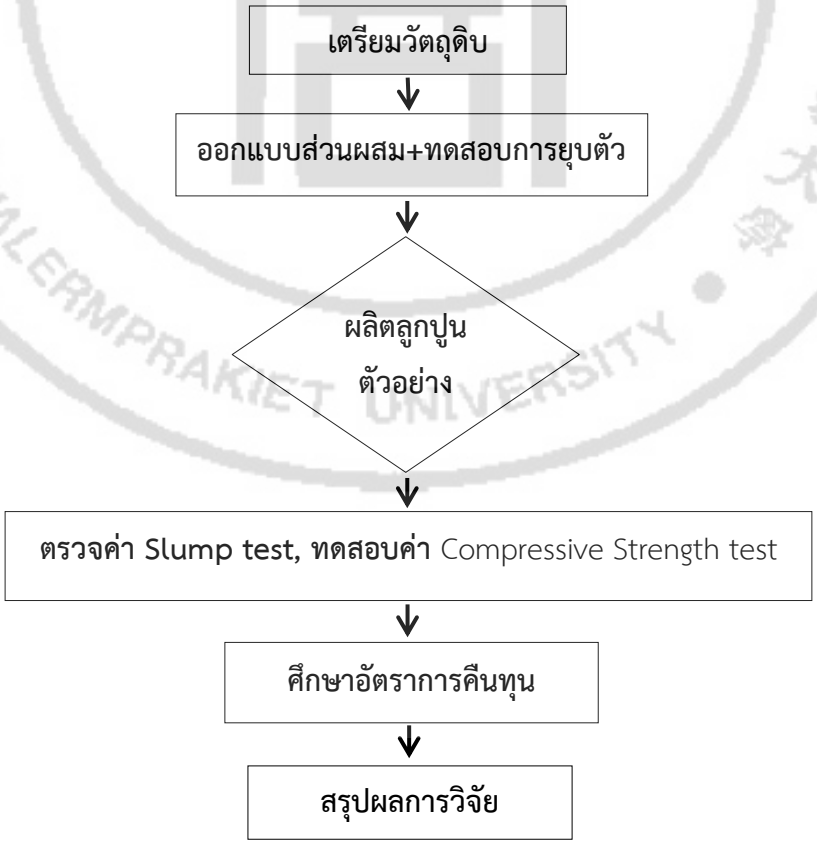
ขั้นตอนที่ 3 การผลิตลูกปูนตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจค่า Slump test, ทดสอบค่า Compressive strength Test

ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาอัตราการคืนทุน

ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลการวิจัย

แผนภูมิที่ 1 การดำเนินงานโครงการ



3.1 วิธีการทดลอง

3.1.1 การออกแบบสัดส่วนการผสมคอนกรีต (Mixed Design)

ในงานวิจัยนี้จะใช้อัตราส่วนผสม 1:2:4 Mixed Design fc′ =260 กก./ตร.ซม. คือใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน หิน 4 ส่วน โดยปริมาตร ซึ่งสามารถแปลงเป็นส่วนผสมโดยน้ำหนักได้ดังนี้ กำหนดให้

หน่วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ = 1,400 กก./ลบ.ม.

หน่วยน้ำหนักของทราย = 1,450 กก./ลบ.ม.

หน่วยน้ำหนักของหิน = 1,500 กก./ลบ.ม.

การคำนวณ

ปูน 1 ถุง 50 กก. มีปริมาตร = 50/1,400 = 0.036 ลบ.ม.

ทราย 2 ส่วน มีปริมาตร = 0.036x 2 = 0.072 ลบ.ม.

น้ำหนักทราย = 0.072x 1,450 = 104 กก.

หิน 4 ส่วน มีปริมาตร = 0.036x 4 = 0.144 ลบ.ม.

น้ำหนักหิน = 0.144x 1,500 = 223 กก.

ปริมาณน้ำสำหรับปูน 1 ถุง เพื่อให้ยุบตัว 10 ซม. = 30 ลิตร

น้ำหนักส่วนผสมเมื่อใช้ปูน 1 ถุง = 50+104+216+30 กก. = 400 กก.

หน่วยน้ำหนักคอนกรีต = 2,400 กก./ลบ.ม.

ต้องใช้ปริมาณปูน = 2,400/400 = 6.0 ถุง = 300 กก./ลบ.ม.

สรุปส่วนผสมใน 1 ลบ.ม.

ปูนซีเมนต์ = 300 กก./ลบ.ม.

ทราย = 624 กก./ลบ.ม.

หิน = 1296 กก./ลบ.ม.

น้ำ = 180 กก./ลบ.ม.

ค่ายุบตัวประมาณ 10 ซม.

3.1.2 ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จที่มีส่วนผสมจาก LFS

การเตรียมคอนกรีตที่ผสม LFS จะได้สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมคอนกรีตที่มีปริมาตรจำนวน 1 ลบ.ม. จะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ หิน ทราย และ LFS แสดงในตารางที่ 5 สำหรับคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จได้ทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) ซึ่งดำเนินการทดสอบในขณะที่ยังเป็นคอนกรีตและทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่อายุของการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 5 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ

ตัวอย่างที่	แทนปูน (%)	ปูน(กก.)	ทราย(กก.)	หิน(กก.)	น้ำ(กก.)	LFS(กก.)
CT	0	300	624	1296	180	0
A1	100	0	624	1296	180	300
A2	75	75	624	1296	180	225
A3	50	150	624	1296	180	150
A4	25	225	624	1296	180	75
B1	100	300	0	1296	180	624
B2	75	300	156	1296	180	468
B3	50	300	312	1296	180	312
B4	25	300	468	1296	180	156
C1	100	300	624	0	180	1296
C2	75	300	624	324	180	972
C3	50	300	624	648	180	648
C4	25	300	624	972	180	324

ทำการบ่มคอนกรีตและทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Test) ของคอนกรีตผสมเสร็จตามมาตรฐาน ASTM C39 และทดสอบการยุบตัว (Slump test) ตามมาตรฐาน ASTM C143 [7] ตามลำดับ

3.1.3 คำอธิบายสัญลักษณ์วัสดุและตัวอย่างทดสอบ

A1 = คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LFS ร้อยละ 100 โดยปริมาตร

A2 = คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LFS ร้อยละ 75 โดยปริมาตร

A3 = คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LFS ร้อยละ 50 โดยปริมาตร

A4 = คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LFS ร้อยละ 25 โดยปริมาตร

B1 = คอนกรีตแทนที่ทรายด้วย LFS ร้อยละ 100 โดยปริมาตร

B2 = คอนกรีตแทนที่ทรายด้วย LFS ร้อยละ 75 โดยปริมาตร

B3 = คอนกรีตแทนที่ทรายด้วย LFS ร้อยละ 50 โดยปริมาตร

B4 = คอนกรีตแทนที่ทรายด้วย LFS ร้อยละ 25 โดยปริมาตร

C1 = คอนกรีตแทนที่หินด้วย LFS ร้อยละ 100 โดยปริมาตร

C2 = คอนกรีตแทนที่หินด้วย LFS ร้อยละ 75 โดยปริมาตร

C3 = คอนกรีตแทนที่หินด้วย LFS ร้อยละ 50 โดยปริมาตร

C4 = คอนกรีตแทนที่หินด้วย LFS ร้อยละ 25 โดยปริมาตร

CT = คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน (ตัวอย่างควบคุม)

1) การทดสอบค่ายุบตัว (Slump Test)

การทดสอบทำโดยตักคอนกรีตใส่ลงในโคนที่มีลักษณะเป็นกรวยยอดตัด ตำด้วยเหล็กตำแล้วจึงค่อย ๆ ยกโคนขึ้นอย่างช้า ๆ คอนกรีตจะยุบตัวลงด้วยน้ำหนักของตัวเองความสูงที่ยุบตัวลงของคอนกรีตที่วัดได้ถือว่าเป็น ค่ายุบตัวของคอนกรีต โดยค่ายุบตัวที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างในประเทศไทย [10] สามารถดูเปรียบเทียบค่าได้จากตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่ายุบตัวที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างในประเทศไทย

ประเภทของงาน	ค่ายุบตัวที่เหมาะสม (ซม.)
พื้นถนนสนามบิน คอนกรีตสำหรับงานทั่วไป	5.0 ± 2.5
คอนกรีตสำหรับงานฐานราก คอนกรีต	7.5 ± 2.5
สำหรับงานคอนกรีตปั๊ม คอนกรีตสำหรับงาน	10.0 ± 2.5
เสาเข็มเจาะเล็ก คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็ม	10.0 ± 2.5
เจาะใหญ่ คอนกรีตสำหรับงานฐานรากแผ่	10.0 ± 2.5
ขนาดใหญ่ หรืองานที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า 15

ที่มา: คอนกรีต เทคโนโลยี-มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2554 : ออนไลน์.

1.1) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) แบบรูปกรวย ซึ่งทำด้วยโลหะซึ่งมีความหนาไม่น้อยกว่า 1.5 มม. มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานและยอดเท่ากับ 20 และ 10 ซม.ตามลำดับ มีความสูง 30 ซม. แสดงในรูปที่ 11

2) ถาดสำหรับทดสอบ (ดูภาพที่ 11)

3) เหล็กกระทุ้งเป็นเหล็กเส้นกลมและตรงมีความยาวประมาณ 60 ซม. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 16 มม. ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองปลายของเหล็กกระทุ้งเป็นรูปมนเพื่อใช้กระทุ้งคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 11

4) ตลับเมตรหรือไม้บรรทัดที่สามารถอ่านได้ละเอียดถึง 1 มม.

5) ถาดสำหรับทำการทดสอบและกรวยทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีตมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานและยอดเท่ากับ 20 และ 10 ซม. ตามลำดับ สูง 30 ซม

ภาพที่ 11 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว

ที่มา: LG Tools-Survey Instrument. 10 มกราคม 59 : ออนไลน์.

ภาพที่ 12 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมตัวอย่างทดลอง

1.2) ขั้นตอนการทำส่วนผสม

สัดส่วนของแบบหล่อตัวอย่าง (ขนาด 15x15x15 ซม.)

1) ปูนซีเมนต์ 4.2 กิโลกรัม

2) ทราย 8.7 กิโลกรัม

3) หิน 18 กิโลกรัม

4) น้ำ 2.5 กิโลกรัม

5) ผง LFS ตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้

1.3) ขั้นตอนการทดลอง

1) ผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสม ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้

2) นำแบบไปชุบน้ำเพื่อให้ผิวเปียกแล้วนำไปวางบนพื้นเรียบที่ไม่ดูดซับน้ำ ใช้เท้าทั้งสองข้างเหยียบไว้ให้แน่น

3) ตักคอนกรีตใส่ลงในแบบให้ได้ 3 ชั้น โดยให้แต่ละชั้นมีปริมาตรเท่ากันใช้เหล็กกระทุ้ง (Tamping rod) กระทุ้ง 25 ครั้ง ทุกชั้น ชั้นล่างให้กระทุ้งจนสุดส่วนชั้นที่สองและชั้นที่สามให้กระทุ้งจนเหล็กผ่านไปในชั้นเดิมเล็กน้อย

4) แต่งผิวหน้าให้เรียบโดยใช้เหล็กกระทุ้งกลิ้งดันคอนกรีตส่วนเกินปากขอบแบบออกไป

5) ค่อย ๆ ยกแบบขึ้นตามแนวดิ่งอย่างระมัดระวังไม่ให้มีการปิดหรือดันด้านข้างใช้เวลาประมาณ 5 วินาที (รวมเวลาตั้งแต่เริ่มบรรจุคอนกรีตลงแบบจนถึงยกแบบขึ้นไม่ควรจะเกิน 2 1/2 นาที)

6) ทำการวัดระยะการยุบตัวของคอนครีตรูปกรวย โดยเปรียบเทียบกับความสูงของกรวยถ้ามีการยุบตัวแบบเฉือน (Shear) ให้ทำซ้ำอีกครั้ง หากมีการยุบตัวเหมือนเดิมถือว่าคอนกรีตนั้นมีการยึดเหนี่ยวในเนื้อคอนกรีตต่ำ (ASTM C 192-81) ระบุว่า ถ้าเป็นการยุบตัวแบบเฉือนจะนำค่าอ่านมาใช้วัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตได้

ภาพที่ 13 การผสมตัวอย่างทดลอง

ภาพที่ 14 การทดสอบการยุบตัว

ภาพที่ 15 การวัดระยะค่ายุบตัว

2) การทดสอบการรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength Test)

โดยจะเน้นที่การทดสอบรับกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก และจะทำการทดสอบที่อายุของการบ่ม 4 ช่วงเวลา คือ 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยการทดสอบค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตจะกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 192 ทรงลูกบาศก์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน ต้องไม่น้อยกว่าค่าที่ออกแบบคือ 260 กก./ตร.ซม.

2.1) เครื่องมือและอุปกรณ์

1) แบบหล่อตัวอย่างการทดลอง ตามมาตรฐานอังกฤษเป็นแบบหล่อรูปลูกบาศก์ มีขนาด 15x15x15 ซม.

2) แท่งกระทุ้ง (Tamping rod) มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มม. ยาว 500 มม. ปลายกลมมน

2.2) ขั้นตอนการทดลอง

1) นำแม่แบบไม้และพลาสติกที่เตรียมไว้ใช้จาระบีทาภายในบาง ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตติดกับแบบ แล้วนำแบบหล่อนี้ไปวางบนพื้นราบ

ภาพที่ 16 การใส่ปูนลงในแบบหล่อและการกระทุ้ง

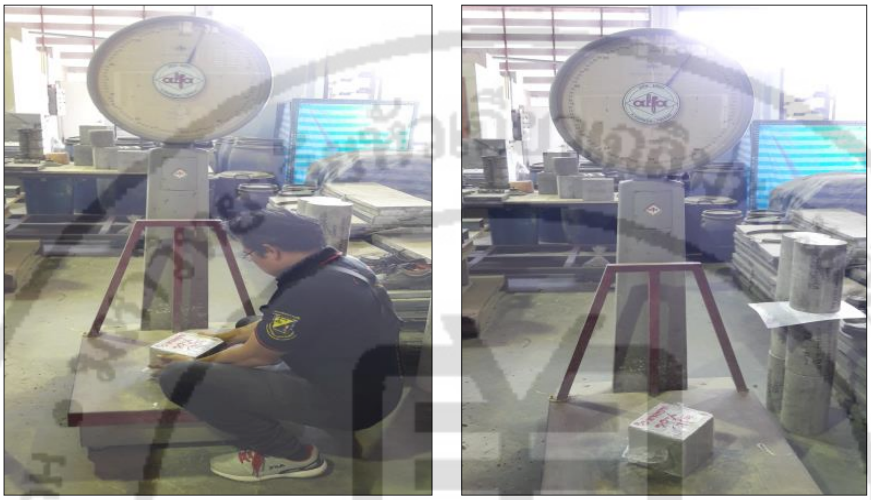
2) เทคอนกรีตที่ผสมแล้ว (ตามส่วนผสมที่คำนวณได้) ใส่ลงในแบบหล่อโดยแบ่งใส่เป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรประมาณ 1/3 ของปริมาตรของแบบหล่อรูทรงลูกบาศก์กระทุ้งคอนกรีตชั้นละ 25 ครั้ง โดยใช้ด้านปลายมนของเหล็กกระทุ้งให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตและให้ลึกเลยเข้าไปในคอนกรีตชั้นล่างเล็กน้อย ชั้นบนต้องใส่คอนกรีตให้สูงกว่าขอบแบบตลอดเวลาที่กระทุ้ง หลังจากนั้นปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบแล้วปิดด้วยกระจกหรือกระดาษอาบน้ำมันเพื่อป้องกันน้ำระเหยทิ้งไว้ 24 ชั่งโมงจึงถอดแบบหล่อออกแล้วนำแท่งคอนกรีตไปบ่มทันทีจนถึงเวลาที่ต้องการทดสอบ ใช้เวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน

ภาพที่ 17 การถอดแบบและการบ่มลูกปูน

2.3) การทดสอบการรับแรงอัด

1) นำลูกปูนตัวอย่างไปวัดขนาดและชั่งน้ำหนักและจดบันทึกค่า

ภาพที่ 18 การนำลูกปูนตัวอย่างชั่งน้ำหนัก



2) นำลูกปูนตัวอย่างมาตั้งที่เครื่อง Compress meter แล้วจึงยกไปวางบนแท่นกดสัมผัสหน้าแท่นทดสอบ Reset ค่า compress meter ไว้ที่ขีด 0 แล้วจึงเดินเครื่องอย่าสม่ำเสมอในอัตราประมาณ 1.43 – 3.47 กก./ซม. 2 วินาที บันทึกค่าต่าง ๆ ไว้ต่อไปเมื่อกดแท่งทดสอบจนถึง Yield Point แล้วให้ถอดเครื่อง Compress meter ออก แล้วค่อย ๆ เพิ่มน้ำหนักจนแตกบันทึกน้ำหนักสูงสุดที่แท่งทดสอบสามารถรับได้ลงในตารางบันทึกผลการทดสอบ

ภาพที่ 19 การนำลูกปูนตัวอย่างขึ้นวางบนเครื่องทดสอบแรงอัด

ภาพที่ 20 การแตกแบบทำลายของลูกปูนอ่านและค่าบันทึกผล

3.2 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่แทนที่ปูนซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ ด้วย LFS

ต้นทุนในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่แปรรูปจาก LFS ได้คำนวณจากราคาวัสดุก่อสร้างต่อหน่วยที่แสดงไว้ในตารางที่ 7 [3]

ตารางที่ 7 ต้นทุนราคาวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการประเมินต้นทุนของผลิตภัณฑ์

วัสดุ	ราคาต่อหน่วย	หน่วย
ทราย	0.08	บาท/กก.
หิน	0.16	บาท/กก.
ปูนซีเมนต์	2.7	บาท/กก.
น้ำ (ราคาน้ำประปา กปภ.)	10	บาท/กก.

ที่มา: LCM_Manual.pdf ลิขสิทธิ์กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2556 **:** ออนไลน์.

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์เชิงสถิติ : ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

สูตรการคำนวณ ทรงลูกบาศก์ $= \frac{P}{A}$

P คือ น้ำหนักกดสูงสุด (แรงอัดประลัย x พื้นที่หน้าตัดของกระบอกไฮดรอริคที่กด)

A คือ พื้นที่หน้าตัดทรงลูกบาศก์

แทนค่า $= \frac{71,400}{225}$ กก./ตร.ซม.

จะได้ค่ารับแรงอัดที่ $= 317.3$ กก./ตร.ซม.

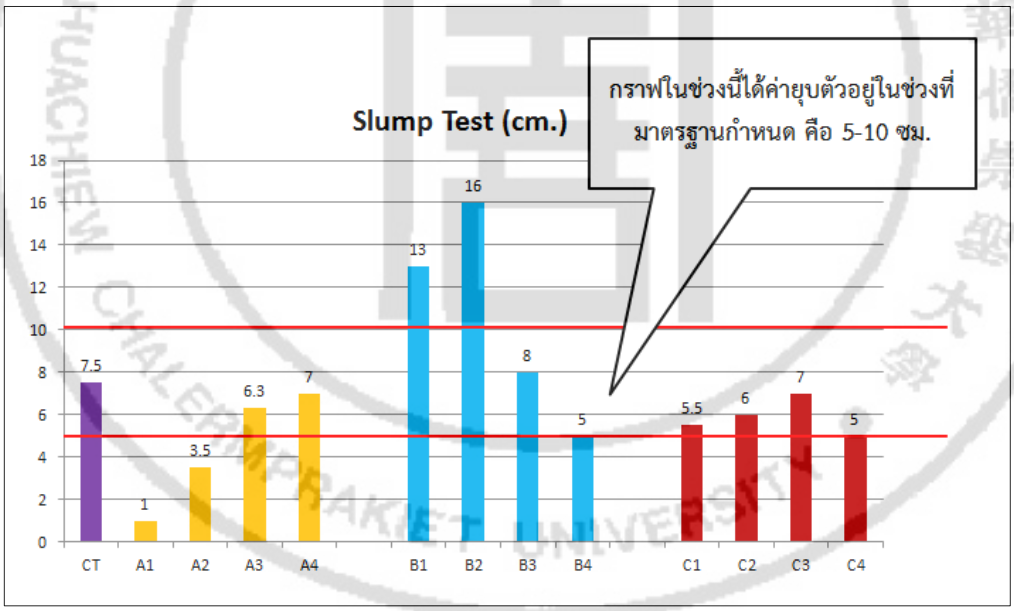
บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีส่วนผสมจาก LFS

4.1.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จ

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าการยุบตัวของ CT หรือตัวอย่างควบคุมอยู่ที่ 7.5 ซม. และพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมีอยู่ 3 กลุ่มด้วยกัน คือ กลุ่มที่หนึ่งค่าการยุบตัวที่ 5-10 ซม. กลุ่มที่สองค่าการยุบตัวต่ำกว่า 5 ซม. และกลุ่มที่สามค่าการยุบตัวมากกว่า 10 ซม. จากแผนภูมิที่ 2 จะพบว่าค่าการยุบตัวในกลุ่มที่หนึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วง 5-10 ซม.ผลการทดสอบจะอยู่ในกลุ่มตัวอย่าง CT, A3, A4, B3, B4, C1, C2, C3 และ C4

แผนภูมิที่ 2 ผลการทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)



4.1.2 ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต CT, A1-A4, B1-B4 และ C1-C4

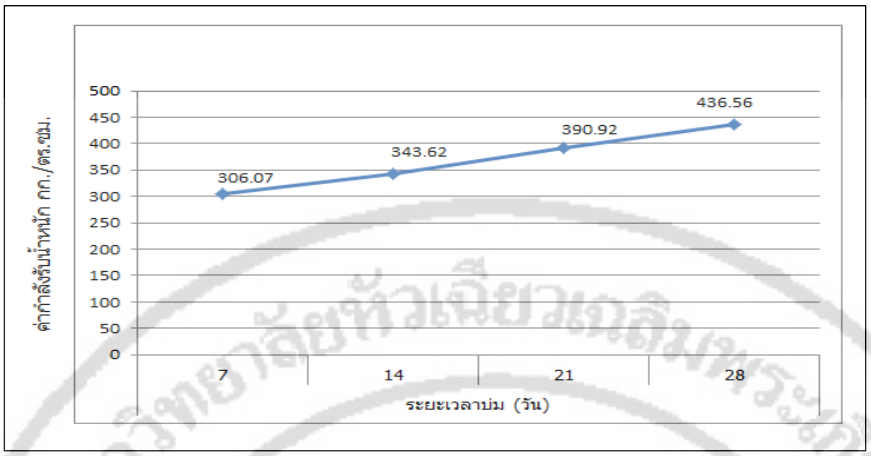
จากผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต A1-A4, B1-B4, C1-C4 และคอนกรีต CT แสดงไว้ในแผนภูมิที่ 3-6 เป็นผลการทดสอบที่อายุ 7, 14, 21, และ 28 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต A1-A4 มีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CT ทุกส่วนผสม การแทนปูนซีเมนต์ด้วย LFS ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง (ดังแสดงในแผนภูมิที่ 4) ยกตัวอย่าง เช่น ที่อายุทดสอบ 21 วัน กำลังอัดของคอรกรีต CT มีค่าเท่ากับ 390.92 กก./ตร.ซม. ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีต A4, A3, A2 และ A1 มีค่าเท่ากับ 131.9, 55.99, 15.5 และ 8.35 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน กำลังอัด

ของคอนกรีต CT มีค่าเท่ากับ 436.56 กก./ตร.ซม. ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีต A4, A3, A2และ A1 มีค่าเท่ากับ 168.5, 130.2, 26.49 และ 15.58 กก./ตร.ซม. มีการพัฒนากำลังอัดตามอายุการทดสอบ เช่น คอนกรีต A3 มีกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 21, และ 28 วัน เท่ากับ 28.66, 39.56, 55.99 และ 130.2 กก./ตร.ซม. การใช้ LFS แทนปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าค่าปกติ เนื่องจาก LFS ยังมีค่าความชื้นสูง แม้ว่าจะผ่านการบ่มมา 30 วัน แต่อายุการบ่มยังน้อยกว่า 6 เดือน [2] ความชื้นยังคงมีอยู่จึงต้องมีการลดค่าความชื้นของ LFS ต่อไป กล่าวคือควรต้องเพิ่มระยะเวลาของการบ่มทั้ง LFS และคอนกรีตก่อนนำมาใช้งาน

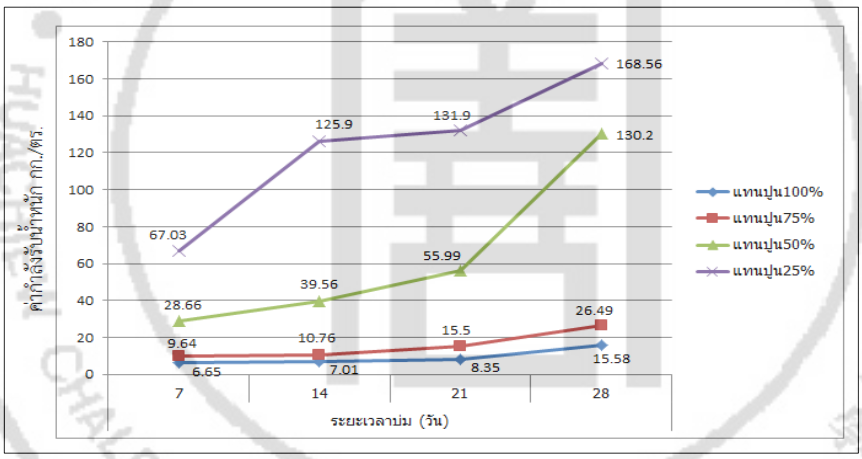
ในแผนภูมิที่ 3 และแผนภูมิที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CT และ B1-B4 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้พบว่าเริ่มมีค่ามากกว่าคอนกรีต A1-A4 กล่าวคือการใช้ LFS แทนที่ทรายโดยที่ไม่ได้ลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เช่น ที่อายุการบ่ม 28 วัน คอนกรีต B4, B3, B2 และ B1 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 179.53, 160.64, 140.02 และ 89.1 กก./ตร.ซม. แต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CT ในทุกส่วนผสม (โดยที่คอนกรีต CT มีกำลังอัดเท่ากับ 436.56 กก./ตร.ซม.

ในแผนภูมิที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต C1-C4 ที่แทนหินโดยไม่ได้ลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ซึ่งเป็นการลดมวลหยาบที่ใหญ่ที่สุดในส่วนผสมลง และการใช้ LFS แทนที่หินในปริมาณร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มที่ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CT ดังแสดงในแผนภูมิที่ 3 และแผนภูมิที่ 6 เช่นที่อายุการทดสอบ 21 วัน คอนกรีต CT มีกำลังอัดเท่ากับ 390.92 กก./ตร.ซม. ในขณะที่คอนกรีต C4, C3, C2 และ C1 มีกำลังอัดเท่ากับ 67.77, 34.66, 26.53 และ 17.09 กก./ตร.ซม. ส่วนที่อายุการทดสอบ 28 วัน คอนกรีต CT มีกำลังอัดเท่ากับ 436.56 กก./ตร.ซม. ในขณะที่คอนกรีต C4, C3, C2 และ C1 มีกำลังอัดเท่ากับ 122.37, 90.59, 58.86 และ 44.14 กก./ตร.ซม. พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่หินด้วย LFS ในช่วงร้อยละ 50-100 โดยน้ำหนัก การพัฒนาของคอนกรีตช้ามาก เช่น ที่อายุ 7, 14 และ 21 วัน คอนกรีต C2 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 2.63, 24.55 และ 26.53 กก./ตร.ซม.

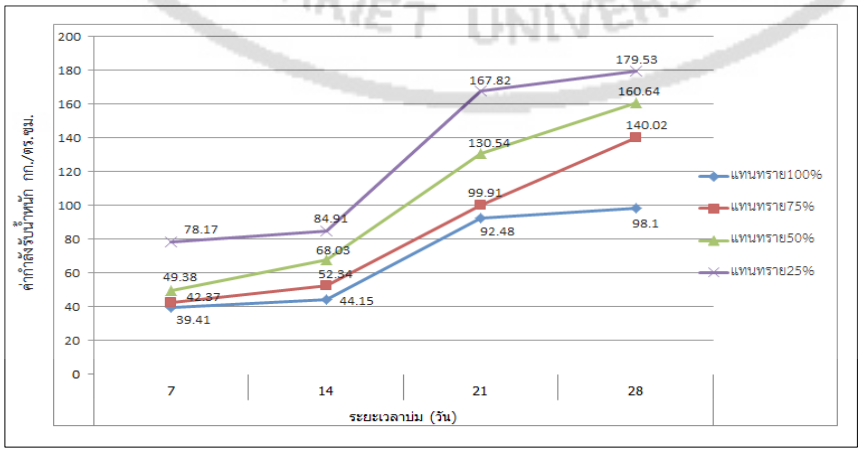
แผนภูมิที่ 3 ค่าการรับกำลังอัดส่วนผสมควบคุมตามค่ามาตรฐาน ASTM C 192



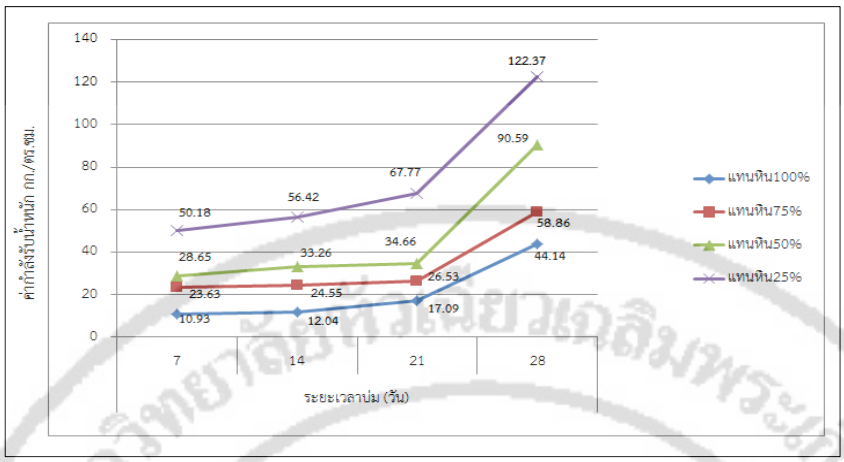
แผนภูมิที่ 4 ค่าการรับกำลังอัดส่วนผสมทดแทนปูนซีเมนต์



แผนภูมิที่ 5 ค่าการรับกำลังอัดส่วนผสมแทนทราย



แผนภูมิที่ 6 ค่าการรับกำลังอัดส่วนผสมแทนหิน



4.2 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

4.2.1 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LFS

ราคาต้นทุนโดยเฉลี่ยของคอนกรีตผสมเสร็จต่อลูกบาศก์เมตรที่ได้จากราคาตลาดกลาง แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าในกรณีที่ไม่ผสม LFS คอนกรีตเสร็จผสมมีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 1,069.08 บาท/ลบ.ม. และราคาต้นทุนของคอนกรีตผสมเสร็จจะลดต่ำลงเมื่อได้ทำการเพิ่มสัดส่วนของการใช้ LFS ทดแทนปูนซีเมนต์ ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จร้อยละ 25, 50, และ 75 ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยของคอนกรีตผสมเสร็จ (แทนปูนซีเมนต์)

ปริมาณ LFS ที่ผสมในคอนกรีต (ร้อยละ)	ราคาต่อหน่วย (บาท/ลบ.ม.)
0	1,069.08
25	866.58
50	664.08
75	461.08

4.2.2 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่แทนที่ทรายด้วย LFS

ต้นทุนโดยเฉลี่ยของคอนกรีตผสมเสร็จต่อลูกบาศก์เมตรที่ได้จากราคาตลาดกลางแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าในกรณีที่ไม่ผสม LFS คอนกรีตเสร็จผสมมีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 1,069.08 บาท/ลบ.ม. และราคาต้นทุนของคอนกรีตผสมเสร็จจะลดต่ำลงเมื่อได้ทำการเพิ่มสัดส่วนของการใช้ LFS ทดแทนทราย ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จร้อยละ 25, 50, และ 75 ดังแสดงใน ตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยของคอนกรีตผสมเสร็จ (แทนทราย)

ปริมาณ LFS ที่ผสมในคอนกรีต (ร้อยละ)	ราคาต่อหน่วย (บาท/ลบ.ม.)
0	1,069.08
25	1,056.60
50	1,044.12
75	1,031.64

4.2.3 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่ทดแทนหินด้วย LFS

ราคาต้นทุนโดยเฉลี่ยของคอนกรีตผสมเสร็จต่อลูกบาศก์เมตรที่ได้จากราคาตลาดกลาง แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าในกรณีที่ไม่ผสม LFS คอนกรีตเสร็จผสมมีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 1,069.08 บาท/ลบ.ม. และราคาต้นทุนของคอนกรีตผสมเสร็จจะลดต่ำลงเมื่อได้ทำการเพิ่มสัดส่วนของการใช้ LFS ทดแทนหิน ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จร้อยละ 25, 50, และ 75 ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยของคอนกรีตผสมผสมเสร็จ (ทดแทนหิน)

ปริมาณLFS ที่ผสมในคอนกรีต (ร้อยละ)	ราคาต่อหน่วย (บาท/ลบ.ม.)
0	1,069.08
25	1, 017.24
50	965.40
75	913.56

<u>ตัวอย่างวิธีการคำนวณ</u>

โดยคำนวณจากค่าราคารวมต่อหน่วย 1 บาท/ลบ.ม.

สูตรการคำนวณ = ราคาปูนซีเมนต์(1กก.) x น้ำหนัก LFS(25%)

= 2.7 x 75

จะลดค่าปูนซีเมนต์ได้ = 202.5 บาท

แล้วนำมาหักกับต้นทุน = 1,069.08 – 202.5 = 866.58 บาท

จากส่วนผสมนี้จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จลงประมาณ 202.5 บาท/ลบ.ม. คิดเป็น 16.40%

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสม ของการใช้ LFS ทดแทนปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ เพื่อเป็นแนวทางในการนำของเสีย ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กที่ไม่มีมูลค่าไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย และเพื่อลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยยังคงได้คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวและค่าการรับกำลังอัดในระดับที่ยอมรับได้ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ผลการทดสอบค่าการยุบตัว

จากการทดลองพบว่าได้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จอยู่ 3 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่ 1 ค่าการยุบตัวในกลุ่มที่หนึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วง 5-10 ซม. ผลการทดสอบจะอยู่ในกลุ่มตัวอย่าง CT(7.5ซม.), A3(6.3ซม.), A4(7ซม.), B3(8ซม.), B4(5ซม.), C1(5.5ซม.), C2(6ซม.), C3(7ซม.) และ C4(5ซม.)

2. กลุ่มที่ 2 ค่าการยุบตัวที่ได้อยู่ในช่วงต่ำกว่า 5 ซม. ผลการทดสอบจะอยู่ในกลุ่มตัวอย่าง A1(1ซม.) และ A2(6.3ซม.)

3. กลุ่มที่ 3 ค่าการยุบตัวที่ได้จะมากกว่า 10 ซม. ผลการทดสอบจะอยู่ในกลุ่มตัวอย่าง B1(13ซม.), และ B2(6.3ซม.)

5.1.2 ผลการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต

1. การใช้ LFS แทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมคือ 25% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในส่วนผสม A4 มีค่ารับกำลังอัด 168.56 กก./ตร.ซม.

2. การใช้ LFS แทนที่ทราย พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมคือ 25% และ 50% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในส่วนผสม B4 มีค่ากำลังอัด 179.53 กก./ตร.ซม. และในส่วนผสม B3 มีค่ารับกำลังอัด 160.64 กก./ตร.ซม.

3. การใช้ LFS แทนที่หิน 25% - 100% พบว่า ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ในส่วนผสม C1-C4 ได้ค่ารับกำลังอัดเฉลี่ย 44.14-122.37 กก./ตร.ซม. ซึ่งต่ำกว่า 145 กก./ตร.ซม. ทุกส่วนผสม

สรุปการที่กำลังอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด คือได้ค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดนี้ อาจมีสาเหตุมาจากหลาย ๆ ประการอันได้แก่ (1) ใช้สัดส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม (2) ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ (3) ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดี (4) การผสมไม่ดีพอ (5) มีสารอินทรีย์ต่าง ๆ มากเกินข้อกำหนด

(6) ใช้หินทรายที่สกปรก (7) ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม (8) การอัดแน่นไม่ถูกต้อง (9) การบ่มไม่เพียงพอ (10) การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง (11) อุณหภูมิผันแปรไป [10]

5.1.3 การวิเคราะห์ราคา

1. จากการเปรียบเทียบกับราคาในท้องตลาดทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 10 พบว่าคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้ LFS แทนที่ปูนซีเมนต์ 25% (A4) มีราคา 866.58 บาท/ลบ.ม. ซึ่งมีราคาต่ำกว่าที่ขายในท้องตลาด 1069.08 บาท/ลบ.ม. จากส่วนผสมนี้จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จลงประมาณ 202.5 บาท/ลบ.ม. คิดเป็น 16.40%

2. จากการเปรียบเทียบกับราคาในท้องตลาดทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่าคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้ LFS แทนที่ทราย 25% (B4) และ 50% (B3) มีราคา 1,056 และ 1044.12 บาท/ลบ.ม. ซึ่งมีราคาต่ำกว่าคอนกรีตผสมเสร็จที่ขายในท้องตลาด 1069.08 บาท/ลบ.ม. จากส่วนผสมนี้จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จลงประมาณ 12.48 และ 24.96 บาท/ลบ.ม. คิดเป็น 6.14% และ คิดเป็น 12.28 % ตามลำดับ

5.2 การอภิปรายผล

5.2.1 ค่าการยุบตัว (Slump)

เหมาะสำหรับการทดสอบคอนกรีตสดในภาคสนาม ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143 จากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าการยุบตัวของ ตัวอย่างควบคุม (CT) อยู่ที่ 7.5 ซม. และพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมีอยู่ 3 กลุ่มด้วยกัน คือ กลุ่มที่ 1 ค่าการยุบตัวที่ 5-10 ซม. กลุ่มที่ 2 ค่าการยุบตัวต่ำกว่า 5 ซม. และกลุ่มที่ 3 ค่าการยุบตัวมากกว่า 10 ซม. โดยพบรูปแบบการยุบตัวของคอนกรีตระหว่างทำการทดสอบ 3 แบบ (1) การยุบตัวแบบถูกต้อง (True Slump) เป็นการยุบตัวของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักของคอนกรีตเองคือ (2) การยุบตัวแบบเฉือน (Shear Slump) เป็นการยุบตัวแบบเฉือนซึ่งเป็นการยุบตัวที่เกิดจากการเลื่อนไถลของคอนกรีตส่วนบน ในลักษณะเฉือนลงไปด้านข้าง (3) การยุบตัวแบบล้ม (Collapse Slump) เป็นการยุบตัวที่เกิดจากคอนกรีตที่มีความเหลวมาก ถ้าหากคอนกรีตมีการยุบตัวแบบเฉือน หรือแยกตัวเพราะเนื่องจากส่วนผสมเหลวเกินไป ซึ่งจากผลการทดสอบค่ายุบตัว(Slump Test) ไม่ได้เป็นค่าที่วัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตโดยตรง [6] แต่เป็นการวัดความข้นเหลวของคอนกรีต (Consistency) หรือลักษณะการไหลตัวของคอนกรีต (Flow Characteristic) แม้วิธีนี้จะไม่เหมาะสมสำหรับทดสอบคอนกรีตที่เหลว หรือแห้งมากแต่ก็มีประโยชน์อย่างมากและสะดวกสำหรับการควบคุมความสม่ำเสมอของการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ เช่น ในกรณีที่ค่ายุบตัวของคอนกรีตมีค่ามากกว่าปกติที่ออกแบบไว้ แสดงให้เห็นว่าจะต้องมีความผิดปกติเกิดขึ้นในสัดส่วนผสม ขนาดคละ หรือความชื้นในมวลรวมซึ่งจะช่วยให้ผู้ผลิตคอนกรีตสามารถ

ตรวจสอบและแก้ไขได้ ตัวอย่างเช่น เมื่อมีการผสม LFS ทดแทนปูนซีเมนต์ในสัดส่วนที่มากขึ้นค่าการยุบตัวของคอนกรีตจะลดน้อยลง นั่นหมายถึง ความสามารถในการเทของคอนกรีตลดต่ำลง สืบเนื่องจาก LFS มีคุณสมบัติของการดูดซึมน้ำได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลทำให้คอนกรีตมีความข้นเพิ่มมากขึ้น หากต้องการตัวอย่างทดลองทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่างมาพัฒนาใช้งานต้องมีการปรับเพิ่ม-ลดปริมาณน้ำตามสัดส่วนที่เหมาะสมโดยคำแนะนำจากผู้ชำนาญการด้านวิศวกรรมโยธา ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 6 สามารถนำผลที่ได้ใน 3 กลุ่ม มาใช้งานได้ดังนี้

1) กลุ่มที่ 1 จะเป็นกลุ่มตัวอย่างทดลองที่ A3(แทนปูน50%), A4(แทนปูน25%), B3 (แทนทราย50%), B4(แทนทราย50%), C1(แทนหิน100%), C2(แทนหิน75%), C3(แทนหิน50%) และ C4(แทนหิน25%)ซึ่งมีค่าการยุบตัวที่ 5-10 ซม. เหมาะสมใช้กับงานพื้นถนนสนามบิน คอนกรีตสำหรับงานทั่วไป และคอนกรีตสำหรับงานฐานราก

2) กลุ่มที่ 2 จะเป็นกลุ่มตัวอย่างทดลองที่ A1(แทนปูน100%) และ A2(แทนปูน75%) ค่าการยุบตัวน้อยกว่า 5 ซม.ส่วนผสมในกลุ่มนี้ไม่เหมาะกับการนำมาใช้งาน ควรนำส่วนผสมดังกล่าวไปปรับเพิ่มอัตราส่วนผสมใหม่เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมตามลักษณะงานที่ต้องการใช้ต่อไป โดยนำมาเปรียบเทียบค่าตามตารางมาตรฐานที่กำหนด

3) กลุ่มที่ 3 จะเป็นกลุ่มตัวอย่างทดลองที่ B1(แทนทราย100%) และ B2(แทนทราย 75%) ค่าการยุบตัวมากกว่า 10 ซม. เหมาะสมใช้กับสำหรับงานคอนกรีตปั๊ม เสาเข็มเจาะเล็กเจาะใหญ่ คอนกรีตสำหรับงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ หรืองานที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น

5.2.2 ค่าการรับกำลังอัด

จากผลการทดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีต พบว่า ผลการรับกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ในส่วนผสมที่ A4 (แทนปูนซีเมนต์ 75 กก.) ได้ค่ากำลังอัด 168.56 กก./ตร.ซม. ในส่วนผสมที่ B3และB4 (แทนทราย 156, 312 กก.) ได้ค่ากำลังอัด 160.64 กก./ตร.ซม. และ 179.53 กก./ตร.ซม. ต่อการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งทั้ง 3 ส่วนผสมนี้ยังได้ค่าไม่ใกล้เคียง Mixed Design (260 กก./ตร.ซม.) จากข้อมูลข้างต้น ส่วนผสมที่ B4 มีค่าทดสอบกำลังอัดที่ดีที่สุด ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบกับงานวิจัย [12] พบว่า ถ้าต้องการส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดระหว่าง 240-260 กก./ตร.ซม. จะใช้ตะกรันเหล็กรวม 207 กก. ต่อการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งส่วนผสมดังกล่าว จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกรันเหล็กลงได้ประมาณ 255 บาท และสามารถลดต้นทุนในการผลิต คอนกรีตลงประมาณ 5% และสำหรับส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่มีการรับ แรงอัดได้สูงสุด พบว่าถ้าใช้ตะกรันเหล็ก 153.9 กก. ในการ ผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร จะทำให้มีการรับแรงอัดได้สูงถึง 287 กก./ตร.ซม. ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของตะกรันเหล็กถึง 15% จากส่วนผสมนี้จะทำให้สามารถลด

ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกรันเหล็กลงได้ประมาณ 125 บาท และ สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงประมาณ 2.8%

สรุปส่วนผสมของ LFS ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ให้กำลังอัดค่อนข้างต่ำกว่าค่า Mixed Design จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้าง แต่สามารถพัฒนาเพื่อใช้ในงานที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงสูง เช่น งานคอนกรีตบล็อก อิฐบล็อก และงานก่อฉาบ เป็นต้น ส่วนในงานคอนกรีตทั่ว ๆ ไป LFS ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับชุมชนหรือในระดับครัวเรือนได้ด้วย เช่น ใช้สำหรับงานเทพื้นถนนทางเข้าหมู่บ้าน เทพื้นลานจอดรถ ทำลานเอนกประสงค์ต่าง ๆ ในโรงเรียน วัด และสถานที่ราชการ ที่ไม่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกมาก ๆ ก็สามารถใช้ LFS แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายได้ถึงร้อยละ 50 และ 75

5.2.3 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิต

นอกจากนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับราคาในท้องตลาด (1069.08 บาท/ลบ.ม.) จะเห็นว่าเมื่อนำตัวอย่างการทดสอบ A4 (แทนปูนซีเมนต์ 75 กก.), B3 และ B4 (แทนทราย 156 กก. และ312 กก.) ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 202.50, 12.48 และ 24.96 บาท/ลบ.ม. ได้ค่ารับกำลังอัดที่ 160.64, 168.5 และ 179.53 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ทุกสัดส่วนผสมที่มีการนำเอา LFS แทนที่ปูนซีเมนต์และแทนทราย สามารถลดปริมาณมวลรวมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จลงได้ แต่ในการประยุกต์ใช้งานควรคำนึงถึงความเหมาะสมในเรื่องของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ต้องได้ค่ารับกำลังอัดตามมาตรฐานที่กำหนดของ ASTM C192 การพิจารณาสำหรับการใช้งานผู้ใช้ที่ต้องการประหยัดราคาในก่อสร้างควรเลือกใช้สัดส่วนที่เหมาะกับประเภทของงานและนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานงานก่อสร้างก่อนนำมาใช้งาน

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้ LFS เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตเพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด LFS และลดต้นทุนของการผลิตคอนกรีต อย่างไร ก็ตามควรมีการศึกษาถึงการเพิ่มปริมาณ LFS และคุณสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ LFS เช่น คุณสมบัติในแง่การใช้งานระยะยาว (Long-term Properties) โดยพิจารณาถึงการหดหรือขยายตัวของคอนกรีต เป็นต้น เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดสำหรับผู้ใช้และผู้อยู่อาศัย

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนา LFS เป็นส่วนผสมของคอนกรีตผสมเสร็จ ให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกมาก ในโครงงานนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเท่านั้น ในส่วนของงานวิจัยที่ควรศึกษาเพิ่มเติมมีดังนี้

1) ในการทดสอบครั้งต่อไปก่อนนำมาใช้งานควรมีควรมีการบ่ม (Aging) LFS โดยการผึ่งแห้งในที่โล่งและมีหลังคาคลุมเพื่อหลีกเลี่ยงการตากน้ำค้างและฝนก่อนนำมาใช้งาน เพื่อลดความชื้นในระยะเวลาไม่น้อยกว่า 6 เดือน

2) ในการทดสอบครั้งต่อไปควรมีการนำ LFS ขนาดต่าง ๆ มาทดลองผสมกับคอนกรีต เพื่อที่จะได้นำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของ LFS ในแต่ละขนาดต่อไป

3) ในการทดลองครั้งต่อไปควรมีการทดสอบลูกปูนตัวอย่างที่มีอายุการบ่มมากกว่านี้ เช่น 60 วัน หรือ 90 วัน อาจจะได้ทราบค่ากำลังอัดที่สามารถรับแรงกดได้มากกว่านี้ เมื่อตัวอย่างมีอายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ HUACHIEW CHALERMPRAKIET UNIVERSITY 華僑崇聖大學

บรรณานุกรม

1. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย.กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้า
2. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. เทคโนโลยีการรีไซเคิลตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นน้ำเหล็ก. โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์.2558. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.dpim.go.th/service/download?articleid =3500&F=6536_(26 มิถุนายน 2559)
3. “กระทรวงอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม” คู่มือการพัฒนาศักยภาพการรีไซเคิลและใช้ประโยชน์วัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทเถ้าลอยจากการใช้ถ่านหิน. สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อมโรงงาน.พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2556.
4. บริษัทโกลบอล เอ็นไวรอนเมนทัล จำกัด. (ม.ค. – มิ.ย. 2558). “รายงาน EIA of GJS”ฉบับที่ 2.
5. “การบ่มคอนกรีต (Concrete Curing)” (21 May 2010 [ออนไลน์] แหล่งที่มา : www.civilclub.net/ การบ่มคอนกรีต-concrete-curing.html (4 กรกฎาคม 2559)
6. “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://www.scconcrete.co.th /scc/services/ (4 กรกฎาคม 2559)
7. ASTM C 143 Standard Test Method for Slump of Portland Cement Concrete.
8. “คอนกรีตเทคโนโลยี 2/59 ปูนซีเมนต์” (10 มกราคม 58) [ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://raungrut.com/ index.php?uid=1&pid=23&menutype=rboard&qid=1 (20 เมษายน 2559)
9. “การบ่มคอนกรีต” (21 May 2010) เล่าเรื่องจากภาพ 16. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : content_form_ picture_17.asp (4 กรกฎาคม 2559)
10. “การทดสอบค่ายุบตัว(Slump Test)” คอนกรีต เทคโนโลยี-มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.[ออนไลน์] แหล่งที่มา : http://mixdesign.cmtc.ac.th/project9/ (1 มกราคม 2560)
11. ชูโชค ศิวะคุณากร. การพัฒนาคอนกรีตกำลังอัดสูงด้วยการผสมเถ้าถ่านหิน [วิทยานิพนธ์] สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า; 2536 http:/misweb.cpu.ku.ac.th/prosopsook/kugrad2.htm (4 กรกฎาคม 2559)
12. ปริญญา คูณมี, วัชร ส่งเสริม และ ธีรเดช วุฒิพรพันธ์. (มกราคม.-เมษายน 2557). “การใช้ตะกรันเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีต” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 24 ฉบับที่ 1.
13. เพ็ญพิชชา คงเพิ่ม, โกศล อรรคเดช อับดุลมาติน, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (มกราคม - มิถุนายน 2559). “การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตแห่งประเทศไทย” วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. ปีที่ 4 ฉบับที่ 1.

บรรณานุกรม (ต่อ)

14. สุวัฒชัย ปลื้มฤทัย. (2555) การพัฒนาคอนกรีตบล็อกจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ สถ.บ. (สาขาสถาปัตยกรรม) กรุงเทพมหานคร : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
15. สุภิชาติ เจนจิระปัญญาและ ปิติศานต์ กร้ำมาตร. (พฤษภาคม – สิงหาคม 2559) “การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม”วารสารวิชาการเทคโนโลยี อุตสาหกรรม. ปีที่ 12 (ฉบับที่ 2)
16. “ชุดทดสอบความข้นเหลวของคอนกรีต SLUMP TEST SET 2” (10 มกราคม 59) [ออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.lgtool.com/soil-test/68-slump-test.html (20 เมษายน 2559)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
เอกสารรับรองคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย

เรียนรู้เพื่อรับใช้สังคม

เอกสารรับรอง

(Certificate of Exemption)

คณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

วันที่ 9 สิงหาคม 2559

ชื่อเรื่อง การศึกษาศักยภาพการนำตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหลือกกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่จากกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน

ชื่อนักวิจัย/หัวหน้าโครงการ นายมิตรชัย รัตนวงศ์

คณะวิชา/หลักสูตร หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ขอรับรองว่า งานวิจัยดังกล่าวข้างต้นได้ผ่านการพิจารณาเห็นชอบโดยสอดคล้องกับประกาศเฮลซิงกิ จากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ลงนาม .....

(รองศาสตราจารย์ ดร.จริยาวัตร คมพยัคฆ์)

ประธานคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

วันที่รับรอง วันที่ 9 สิงหาคม 2559

เลขที่รับรอง ย.431/2559

วันที่ให้การรับรอง: 9 สิงหาคม 2559

วันหมดอายุใบรับรอง: 8 สิงหาคม 2561

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ HUACHIEW CHALERMPRAKIET UNIVERSITY 華僑崇聖大學

ภาคผนวก ข
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
A1	=	คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LFS ร้อยละ 100 โดยปริมาตร
A2	=	คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LFS ร้อยละ 75 โดยปริมาตร
A3	=	คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LFS ร้อยละ 50 โดยปริมาตร
A4	=	คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย LFS ร้อยละ 25 โดยปริมาตร
B1	=	คอนกรีตแทนที่ทรายด้วย LFS ร้อยละ 100 โดยปริมาตร
B2	=	คอนกรีตแทนที่ทรายด้วย LFS ร้อยละ 75 โดยปริมาตร
B3	=	คอนกรีตแทนที่ทรายด้วย LFS ร้อยละ 50 โดยปริมาตร
B4	=	คอนกรีตแทนที่ทรายด้วย LFS ร้อยละ 25 โดยปริมาตร
C1	=	คอนกรีตแทนที่หินด้วย LFS ร้อยละ 100 โดยปริมาตร
C2	=	คอนกรีตแทนที่หินด้วย LFS ร้อยละ 75 โดยปริมาตร
C3	=	คอนกรีตแทนที่หินด้วย LFS ร้อยละ 50 โดยปริมาตร
C4	=	คอนกรีตแทนที่หินด้วย LFS ร้อยละ 25 โดยปริมาตร
CT	=	ตัวอย่างควบคุม (Control Sample)
EAF	=	เตาหลอมเหล็กด้วยไฟฟ้า (Electric Arc Furnace)
LFS	=	ตะกรันของเตาอุ่นน้ำเหล็ก (Ladle Furnace Slag)
กก.	=	กิโลกรัม
กก./ตร.ซม.	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
กก./ลบ.ม.	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ซม.	=	เซนติเมตร
มม.	=	มิลลิเมตร
ลบ.ม	=	ลูกบาศก์เมตร

ภาคผนวก ค
การตรวจกากขี้เหล็กโดยวิธี Leaching Test

การตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็กของโครงการโรงเหล็กรีดร้อน บริษัท จี เจ สตีล จำกัด (มหาชน) จำนวน 2 สถานี คือ บริเวณกองกากขี้เหล็ก (Black Slag และ Gray Slag) ภาพแสดงการเก็บตัวอย่างกากขี้เหล็ก แสดงดังภาพที่ 1 Black Slag Gray Slag

ภาพที่ 1 การเก็บตัวอย่างกากขี้เหล็ก (Black Slag Gray Slag)

วิธีการตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็ก

การตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็ก ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และวิธีมาตรฐานของ APHA, AWWA and WEF Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 21st Edition, 2005 โดยมีรายละเอียดวิธีการตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็ก แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดวิธีการตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็ก

ลำดับ	พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวิเคราะห์
1	As	Atomic Absorption, Furnace Technique
2	Cd	Atomic Absorption, Direct Aspiration
3	Cr^{6+}	Colorimetric (Discrete-FIA)
4	Pb	Atomic Absorption, Furnace Technique
5	Hg	Manual Cold-Vapor Technique (CVAA)
6	Ni	Atomic Absorption, Furnace Technique
7	Zn	Atomic Absorption, Furnace Technique

ผลการตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็ก

ผลการตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็ก ของโครงการโรงเหล็กรีดร้อน บริษัท จี เจ สตีล จำกัด (มหาชน) จำนวน 2 สถานี ประจำเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม 2557 ในวันที่ 09 พฤศจิกายน 2557 แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็กประจำเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม 2557
โครงการโรงเหล็กรีดร้อน บริษัท จี เจ สตีล จำกัด (มหาชน)
จัดทำรายงานโดย บริษัท โกลบอล เอ็นไวรอนเมนทัล แมนเนจเม้นท์ จำกัด

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการตรวจวิเคราะห์ 09 พฤศจิกายน 2557		Soluble Threshold Limit Concentration, STLC (มิลลิกรัมต่อลิตร)	มาตรฐาน
		Black Slag	Gray Slag		
Chromium	mg/kg	0.055	0.045	5	≤ 2,500
Cadmium	mg/kg	0.002	0.006	1.0	≤ 100
Mercury	mg/kg	**ND	**ND	0.2	≤ 20
Lead	mg/kg	0.008	0.004	5	≤ 1,000
Arsenic	mg/kg	0.001	0.002	5	≤ 500
Nickel	mg/kg	<0.001	0.013	20	≤ 2,000
Zinc	mg/kg	1.033	0.098	250	≤ 5,00

หมายเหตุ : ≤ = น้อยกว่าหรือเท่ากับ, - = ไม่มีมาตรฐานกำหนด

มาตรฐาน : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

ชื่อผู้เก็บตัวอย่าง : นายนพพร นวลเกษร

ชื่อผู้บันทึก : นายมโนรมย์ สมรูป

ชื่อผู้ตรวจสอบ/ควบคุม : นายสมเกียรติ์ ท้วมแสง

ชื่อผู้ตรวจวิเคราะห์ : ศูนย์อ้างอิงทางห้องปฏิบัติการและพิษวิทยาสำนักโรคจากการประกอบอาชีพและ สิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข

ชื่อผู้วิเคราะห์/ควบคุม : นายวิกรม จันทเนาว์

เบอร์โทรศัพท์ : 0-2968-7633

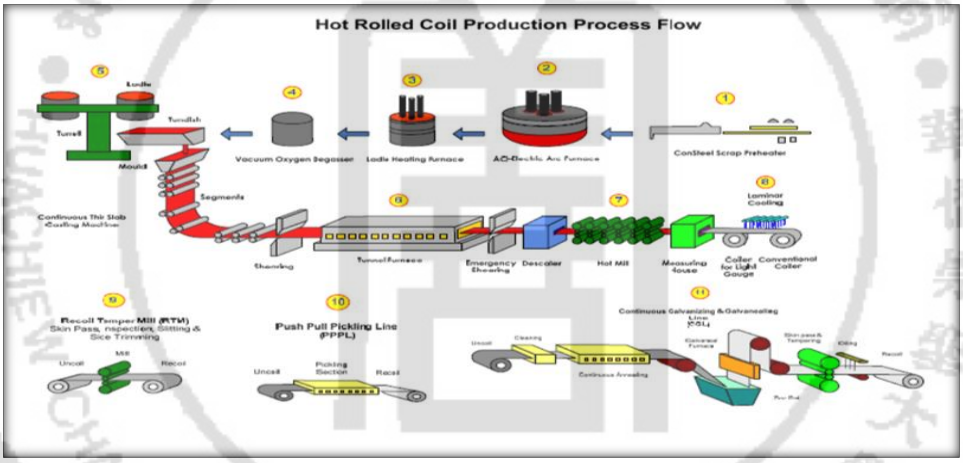
สรุปผลการตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็ก

จากผลการตรวจวิเคราะห์กากขี้เหล็ก ของโครงการโรงเหล็กรีดร้อน บริษัท จี เจ สตีล จำกัด (มหาชน) ประจำเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม 2557 ในวันที่ 09 พฤศจิกายน 2557 จำนวน 2 สถานี พบว่า ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักพบว่า (Black Slag และ Gray Slag) มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ดังนั้น สรุปได้ว่า (Black Slag และ Gray Slag) ไม่เป็นของเสียอันตราย ตามที่ระบุไว้ในประกาศ ทั้งนี้ ไม่รวมถึงรายการทดสอบอื่น ๆ ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

ภาคผนวก ง
กระบวนการหลอมเหล็กและเกิดกากอุตสาหกรรม

โรงงานผลิตเหล็กรีดร้อน เป็นโรงงานผลิตเหล็กแผ่นขนาดย่อม (Mini-mill) ประกอบด้วยการหลอมวัตถุดิบด้วยไฟฟ้า (Electric Arc Furnace), การปรุงแต่งน้ำเหล็ก (Ladle Heating Furnace), การหล่อเหล็กแผ่นอย่างบาง (Thin Slab Casting) และกระบวนการรีดร้อน (Hot Strip Mill) ต่อเนื่องผ่านแท่นรีด 6 แท่น โดยวัตถุดิบสำหรับการหลอมถูกส่งมาตามระบบลำเลียงและให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง (Consteel Process) แสดงกระบวนการผลิตดังภาพที่ 1

ขั้นตอนการหลอมเหล็ก



ขั้นตอน Raw material Feeding

เมื่อแผนก CWH. (Sub Raw material) รับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต จะนำวัตถุดิบชนิดต่างเข้าเก็บในถังจัดเก็บ (Bin) โดยการFeeding เข้าไปจัดเก็บในถังเก็บตามแบบ (Drawing)

ปัจจุบันปริมาณการผลิตของบริษัทอยู่ที่ประมาณ 19 Heat/Day และการหลอม 1 Heat ใช้วัตถุดิบประมาณ 200 ตัน จะได้น้ำเหล็กประมาณ 180 ตันในส่วนวัตถุดิบประเภทปูนขาว (Lime) ทาง CWH. (Sub Raw material) จะสั่งปูนขาว (Lime) เข้ามาใช้ในการผลิตประมาณ 200 ตันต่อวัน โดยให้จัดส่งเข้ามา 4 ครั้ง ๆ ละประมาณ 50 ตัน

เศษเหล็กที่ผ่านการคัดเลือกขนาดและแยกประเภทแล้ว จะถูกลำเลียงด้วย Conveyor steel เข้าสู่เตาหลอม EAF. ในขณะที่ป้อนวัตถุดิบลงสู่เตาหลอมนั้น ระบบดูดอากาศ (Bag house) ก็จะทำงานอยู่ตลอดเวลา เตาหลอมก็จะทำการหลอมเหล็ก เมื่อเศษเหล็กหลอมละลายแล้วก็จะทำการตรวจวัดอุณหภูมิและเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ทางเคมี จากนั้นจะทำให้บริสุทธิ์ (Refining) ด้วยการ

เติมวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติกำจัดสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ออก หลังจากนั้นก็จะเติมถ่านโค้กซึ่งจะทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกากขี้เหล็ก (Slag) และทำให้การแยกตัวของกากขี้เหล็กกับน้ำเหล็กตอน Tap ได้ดี เมื่ออุณหภูมิน้ำเหล็กสูงถึง 1620 องศาเซลเซียส ก็จะ Tap แยกน้ำเหล็กออกจากกากขี้เหล็ก โดยเทลงสู่ถังรับน้ำเหล็ก (Ladle)

ในการดำเนินการตั้งแต่ต้นจนสิ้นสุดขั้นตอน มีการเติม Lime และ M-Fet หรือ Cinder ball ดังนี้

เมื่อ Start C Flow ร่วมกับ Oxygen flow เติม Lime 2-3 Tons และ M-Fet หรือ Cinder ball 500-700 Kgs.

เมื่อ Flow rate ของ Carbon สัมพันธ์กับ Slag Foaming Volume เติม Lime 2-3 Tons และ M-Fet หรือ Cinder ball 500-700 Kgs.

เมื่อ Scrap End of heat อยู่ที่ปลาย CC1 เติม Lime 2-3 Tons

เมื่อ Scrap End of heat อยู่ต้นถึงกลาง CC1 เติม M-Fet หรือ Cinder ball 500-700 Kgs. หลังจาก Scrap End of heat เข้าสู่ Preheat เติม Lime 2 Tons

หมายเหตุ

การจะใช้ M-Fet หรือ Cinder ballเติม ขึ้นอยู่กับเตาที่ใช้หลอม ถ้าเป็นเตาใหม่(3 วัน)จะใช้ M-Fet ถ้าเป็นเตาเก่า (วันที่4) จะใช้Cinder ball

น้ำเหล็กที่ถูกเทลงในถังรับน้ำเหล็กจะถูกกำจัดออกซิเจนออก (Deoxidize) ด้วยการเติม Aluminum, Ferro alloy เช่น Ferrosilicon Carbon Ferromanganese และ Argon แล้วเคลื่อนถังน้ำเหล็กไปสู่เตาปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (LHF) เมื่อถึงขั้นตอนนี้จะมีการตรวจวัดอุณหภูมิ Active O_2 และเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ทางเคมี และเมื่อทราบผลวิเคราะห์ก็จะทำการเติมส่วนผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กให้มีคุณสมบัติตามต้องการ (ส่วนผสมที่ใช้ในการปรุงน้ำเหล็ก ชนิดเกรดเหล็กที่ผลิตดังตาราง EAF Alloy Taping Table) และเมื่อพบว่าน้ำเหล็กมีคุณสมบัติตามที่ต้องการแล้วและมีอุณหภูมิถึง 1600 องศาเซลเซียส ก็จะเคลื่อนถังรับน้ำเหล็ก (Ladle) จากเตา LHF ไปยังขั้นตอนของการหล่อต่อไป

กากอุตสาหกรรมจากการผลิตมีปริมาณดังนี้

- Slag ประมาณ 25-30 ตัน/วัน , 900 ตัน/เดือน , 10800 ตัน/ปี
- Dust ประมาณ 40-50 ตัน/วัน , 1500 ตัน/เดือน , 18000 ตัน/ปี
- ฝุ่นLime ประมาณ 8-10 ตัน/วัน , 300 ตัน/เดือน , 3600 ตัน/ปี

- ฝุ่น Lime จาก Bag house เขียว มีประมาณ 3 ตัน/วัน จากการ Feed ปูนขาว 200 ตัน
- ฝุ่น Lime จากการ Drain ทิ้งเนื่องจากการผลิต 5-7 ตัน/วัน

หมายเหตุ

ค่าของกากอุตสาหกรรมทั้งหมดคิดจากการหลอมตลอด 24ชั่วโมง (19 Heat)

ภาคผนวก จ
ใบรายงานผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ใบรายงานผลทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

วันที่ทดสอบ .....

บริษัท ..... จำนวน .....ตัวอย่าง

ลำดับที่	วันที่หล่อ	ส่วนของโครงสร้าง	ความยุบตัว (ซม.) Slump(cm)	แรงอัดที่กำหนดในแบบ (กก/ซม.^{2})	น้ำหนัก (ก.ก.)	แรงกดอัด (ก.ก) Max load (Kg)	หน่วยแรงกด (กก./ซม.^{2}) Stress(Kg/cm^2)

ผู้ทำการทดสอบ .....

(.....)

MAHIDOL UNIVERSITY
Wisdom of the Land

ศูนย์วิเคราะห์ทดสอบวัสดุก่อสร้างและสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170
โทรศัพท์ 0 2889 2138 ต่อ 6396-7 , 6387 โทรสาร 0 2889 2138 ต่อ 6388

เริ่มใช้ 1 มีนาคม พ.ศ. 2560

แบบคำขอรับบริการทดสอบวัสดุ: คอนกรีต

(ข้อมูลสำหรับเขียนใบเสร็จรับเงิน) เลขประจำตัวผู้เสียภาษี.....ชื่อบริษัท .....

ที่อยู่ เลขที่ ..... หมู่ที่ ..... ถนน ..... แขวง/ตำบล .....

เขต/อำเภอ .....จังหวัด ..... รหัสไปรษณีย์ .....

วันที่.....เดือน .....พ.ศ. .....

บริษัท/หจก./ร้าน .....เบอร์โทรศัพท์ติดต่อ.....

ชื่อโครงการก่อสร้าง .....

สถานที่ก่อสร้าง .....

รายการตัวอย่างส่งทดสอบ ☐ CPAC ☐ ทีพีไอ ☐ น่ำเฮง ☐ นครหลวง ☐ กาญจนา ☐ บัวหลวง ☐ อื่นๆ ระบุ.....

ก้อนตัวอย่างคอนกรีต	จำนวน (ก้อน)	วันที่หล่อคอนกรีต	ประเภทโครงสร้าง	แรงอัดที่กำหนดในแบบ (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัว Slump (cm.)	รายละเอียดเพิ่มเติมที่ต้องการให้ระบุในใบรับรองผลทดสอบ
☐ ทรงกระบอก ∅15x30 ซม. ☐ ทรงลูกบาศก์☐ 15x15x15 ซม. ☐ อื่นๆ (ระบุ).....						
☐ ทรงกระบอก ∅15x30 ซม. ☐ ทรงลูกบาศก์☐ 15x15x15 ซม. ☐ อื่นๆ (ระบุ).....						
☐ ทรงกระบอก ∅15x30 ซม. ☐ ทรงลูกบาศก์☐ 15x15x15 ซม. ☐ อื่นๆ (ระบุ).....						
☐ ทรงกระบอก ∅15x30 ซม. ☐ ทรงลูกบาศก์☐ 15x15x15 ซม. ☐ อื่นๆ (ระบุ).....						
รวม						

ผู้ส่งตัวอย่างทดสอบ .....
(.....)
วันที่...../...../.....

ผู้รับตัวอย่างทดสอบ .....
(.....)
วันที่...../...../.....

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล นายมิตรชัย รัตนวงศ์

วัน เดือน ปีเกิด 28 ตุลาคม 2513

ที่อยู่ปัจจุบัน 668/35 หมู่บ้านเสริมศิริ ถนนพระยาสุเรนทร์ แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2555 คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช สาธารณสุขศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์สุขภาพ)

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2540 – 2542 บริษัท จี สตีล จำกัด (มหาชน) อำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง

พ.ศ. 2542 – 2548 บริษัท ยู เอ็ม ซี เม็ททอล จำกัด

พ.ศ. 2548 – 2559 บริษัท จี เจ สตีล จำกัด (มหาชน) อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานในปัจจุบัน

พ.ศ. 2559 – 2560 ผู้ช่วยผู้จัดการหน่วยงานความปลอดภัยในการทำงาน บริษัท เอ็มเค เรสโตรองต์ กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) อำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ

HUACHIEW CHALERMPRAKIET UNIVERSITY 華僑崇聖大學