สมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมกากของเสียอลูมิเนียมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์
ด้วยเถ้าแกลบขาวและเถ้าลอย

นายวิรัตน์ พานทอง ปทส. (โยธา)

โครงงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

คณะกรรมการสอบโครงงานวิจัย

..... ประธานกรรมการสอบโครงงานวิจัย
(ผศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิจัย
(ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิจัย (ร่วม)
(ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัตน์)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ชูชัย สุจิวรกุล)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อโครงงานวิจัย	สมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมกากของเสียอลูมิเนียมที่มีการแทนทีปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาวและเถ้าลอย
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายวิรัตน์ พานทอง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด
	ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัตน์
หลักสูตร	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	ครุศาสตร์โยธา
คณะ	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมกากของเสียอลูมิเนียม ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาวและเถ้าลอย โดยทุกตัวอย่างใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาวหรือเถ้าลอย : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมกากของเสียอลูมิเนียมจากโรงงานหลอมอลูมิเนียมในปริมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักวัสดุยึดประสานและมีอัตราส่วนระหว่างวัสดุยึดประสาน : ทรายเท่ากับ 1 : 0.5 ผลการทดลองพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาวและปูนขาว ทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการนำความร้อนต่ำกว่าตัวอย่างที่มีและไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและปูนขาว แต่มีการดูดซึมน้ำมากกว่า โดยค่ากำลังรับแรงอัด และค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบา ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาวและปูนขาวมีค่าเท่ากับ 53 กก./ซม^2 และ การดูดกลืนน้ำเท่ากับ 485 กก./ลบ.ม ซึ่งมีค่า ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1505-2541ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ – อบไอน้ำ ชั้นคุณภาพ 4 แต่มีค่าความหนาแน่น 887 กก./ลบ.ม เกินค่ามาตรฐาน ส่วนผลการทดสอบการรั่วไหลของอลูมิเนียมจากคอนกรีตมวลเบา พบว่าการรั่วไหลมีค่าต่ำ 4.96 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด (US EPA) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตได้ พบว่ามีค่าการนำความร้อนต่ำเท่ากับ 0.2022 วัตต์/เมตร.เคลวิน

คำสำคัญ : คอนกรีตมวลเบา / กากของเสียอลูมิเนียม / เถ้าแกลบขาว / เถ้าลอย / การรั่วไหล

Research Project Title	Properties of Lightweight Concrete Containing Al-Wastes Residue and Replacing Ordinary Portland Cement with White Rice Husk Ash and Fly Ash
Research Project Credits	6
Candidate	Mr. Wirut Panthong
Research Project Advisors	Dr. Teerawut Muhummud
	Dr. Rungroj Piyaphanuwat
Program	Master of of Science in Industrial Education
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Technology Education
Faculty	Industrial Education and Technology
B.E.	2554

Abstract

This research investigated the properties of lightweight concrete containing Al-waste residue and using white rice husk ash (WHA) and fly ash(FA) to replace Ordinary Portland Cement (OPC). All specimens were prepared using the binder with the ratio of OPC : WHA or FA : quick lime 30:50:20. The additional of 30% of Aluminum dust (AD),by weight of the binder, from Aluminum melting factory and the ratio of binders to sand 1:0.5 were also used for the mixture. The test results showed that the use of WHA and quick lime to replace OPC gave the lightweight concrete specimens a lower compressive strength, bulk density and thermal conductivity than lightweight concrete with and without substituted OPC by FA and quick lime did but there was water adsorption was higher than. The compressive strength and water absorption lightweight concrete of the using WHA and quick lime to replace OPC were 53 kg/cm^2 and 485 kg/m^3 met the requirement of Thai Industrial Standard TIS 1505-2541 class 4 for autoclaved aerated lightweight concrete, while their bulk density (887 kg/cm^3) did not. The TCLP test showed that the Al concentration in leachates (4.96 mg./L) was lower than regulatory limit (US EPA) In addition, the thermal conductivity of lightweight concrete was 0.2022 W/m-K.

Keywords : Lightweight concrete /Al-waste residue / White rice husk ash / Fly ash / Leaching

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไป ได้รับการอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ที่ให้ความกรุณาทั้งด้านความรู้ คำแนะนำตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด และดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ผศ.ดร.ชูชัย สุจิวรกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้แนวคิดเป็นประโยชน์และมีคุณค่ายิ่งต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์โยธา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและหน่วยงานผู้เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี แห่งที่ 2 วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์และคำปรึกษาที่จำเป็นต่อการวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด ทำให้มีโอกาสได้ศึกษาต่อ ตลอดจนผู้มีพระคุณ ครู-อาจารย์ ผู้ให้โอกาสประสิทธิ์ประศาสตร์วิชาความรู้ รวมถึงครอบครัวที่เป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
กิตติกรรมประกาศ		ง
สารบัญ		จ
รายการตาราง		ซ
รายการรูปประกอบ		ฎ
บทที่		
1. บทนำ		**1**
1.1	ที่มาและความสำคัญ	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการทำงานวิจัย	2
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย	2
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง		**3**
2.1	คอนกรีตมวลพรุน	3
2.2	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	5
2.3	ปูนขาว (Lime)	12
2.4	วัสดุปอสโซลาน	16
2.5	ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	20
2.6	ปฏิกิริยาปอซโซลาน	23
2.7	มวลรวม	23
2.8	ทฤษฎีการนำความร้อน	25
2.9	อะลูมิเนียม	27
2.10	การรั่วไหล	28
2.11	งานวิจัยที่ผ่านมา	29

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
3.	**วิธีการวิจัย**	**33**
	3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	33
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	35
	3.3 อัตราส่วนผสมและปริมาณน้ำที่ใช้	36
	3.4 ลักษณะของตัวอย่าง	39
	3.5 การเตรียมตัวอย่าง	39
	3.6 การทดสอบ	42
4.	**ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล**	**45**
	4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกรันอลูมิเนียม	45
	4.2 ผลการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา	46
	4.3 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตมวลเบา	48
	4.4 ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา	50
	4.5 การดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบา	52
	4.6 การรั่วไหลของอะลูมิน่า	54
	4.7 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา	55
	4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัด การดูดกลืนน้ำ การรั่วไหลของอลูมิน่า และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน	57
5.	**สรุปและข้อเสนอแนะ**	**61**
	5.1 สรุปผลการทดลอง	61
	5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง		**64**

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ก. ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา 68

ข. ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา 78

ค. ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบา 88

ง. ผลการทดสอบการรั่วไหลของอะลูมิน่าของคอนกรีตมวลเบา 92

จ. ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา 94

ฉ. รูปตัวอย่างการทดสอบ 96

ประวัติผู้วิจัย 99

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
2.2	สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	7
2.3	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักของปูนเม็ด	8
2.4	สมบัติของปูนสุกและปูนขาว	13
2.5	สมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์	13
2.6	สมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม	14
2.7	สมบัติและสารประกอบของปนขาวแต่ละชนิด	16
2.8	องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบ	18
2.9	ผลสรุปสมบัติของ เถ้าลอย เทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	19
3.1	รายละเอียดของตัวอย่างและอัตราส่วนผสมที่ใช้	37
4.1	องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence ของกากตะกรันอลูมิเนียม	45
4.2	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา	46
4.3	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน	48
4.4	ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน	50
4.5	ค่าการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน	52
4.6	ค่าความเข้มข้นของอลูมิน่าที่รั่วไหลด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)	54
4.7	สมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบา	55
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัด การดูดกลืนน้ำ การรั่วไหลของอลูมิน่า และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน	57
ก.1	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (Control) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนดิบเท่ากับ 80 : 20	69
ก.2	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (Control-N) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนดิบเท่ากับ 80 : 20มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่ไม่บดในปริมาณร้อยละ 30โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน	70

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง **หน้า**

ก.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (Control-S) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนดิบเท่ากับ 80 : 20มีการเติมกากของเสียอะลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน 72

ก.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (CPFA) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนดิบ เท่ากับ 30 : 50 : 20 73

ก.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (CPFA-N) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนดิบเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่ไม่บดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน 74

ก.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (CPFA-S) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนดิบ เท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน 75

ก.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (CRHA) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนดิบ เท่ากับ 30 : 50 : 20 76

ก.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (CRHA-N) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนดิบ เท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่ไม่บดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน 77

ก.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา (CRHA-S) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนดิบ เท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน 79

ข.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (Control) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนดิบเท่ากับ 80 : 20 77

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ข.2	ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (Control-N) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนดิบเท่ากับ 80 : 20มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่ไม่บดในปริมาณร้อยละ 30โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน	80
ข.3	ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (Control-S) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนดิบเท่ากับ 80 : 20มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน	81
ข.4	ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CPFA) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนดิบเท่ากับ 30 : 50 : 20	82
ข.5	ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CPFA-N) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนดิบเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่ไม่บด ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน	83
ข.6	ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CPFA-S) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนดิบเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน	84
ข.7	ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CRHA) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนดิบเท่ากับ 30 : 50 : 20	85
ข.8	ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CRHA-N)ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนดิบเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่ไม่บดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน	86

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ข.9	ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CRHA-S)ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนดิบ เท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมการของเสียอะลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน	87
ค.1	ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Absorption) ของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน (Control, Control-N, Control-S	89
ค.2	ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Absorption) ของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน (CPFA, CPFA-N, CPFA-S)	90
ค.3	ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Absorption) ของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน (CRHA, CRHA-N, CRHA-S)	91
ง.1	ผลการทดสอบการชะละลาย (Leachate Test) โดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP ตามมาตรฐาน US EPA 1992) จะทดสอบโดยการใช้สารละลายชะละลายเป็นเวลา 1±2 ชั่วโมง	93
จ.1	ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบาโดยวิธี Thermal Constant Analysis (TCA) เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ Hot Disk Thermal Constant Analyser (Hot Disk AB)	95

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	รูปร่างของ C_3S ซึ่งเป็นผลึก 6 เหลียม และ C_3S เป็นเม็ดกลมสีดำ	7
2.2	การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ a) กำลังอัดของสารประกอบหลัก b) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	8
2.3	อนุภาคของซีเมนต์ เทียบกับอนุภาคของ เถ้าลอยบดละเอียด	19
3.1	Los Angeles Abrasion Machine	35
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	36
3.3	การหาปริมาณน้ำด้วยวิธี Flow table test	39
3.4	เครื่องผสมมอร์ต้าร์	40
3.5	การเทเนื้อมอต้าร์ประมาณ 2ใน3ของความสูงของแบบหล่อ	40
3.6	เทมอร์ต้าร์ลงในแบบหล่อ และปาดหน้าให้เรียบ	41
3.7	บ่มน้ำเป็นระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน	41
3.8	ตัวอย่างที่พร้อมนำไปทดสอบ	42
3.9	การนำทดสอบการรับแรงอัด	42
3.10	การชั่งน้ำหนักและวัดขนาดมิติของตัวอย่าง	43
3.11	การนำตัวอย่างทดสอบเข้าตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ ± 115° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	44
4.1	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ (Control) และที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย (CPFA) และ ด้วยเถ้าแกลบขาว (CRHA)	47
4.2	ผลกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทุกชุด ที่ อายุ 28 วัน	49
4.3	ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน	51
4.4	การดูดกลืนน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน	53
4.5	ค่าความเข้มข้นของอลูมิน่า ของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน	54
4.6	สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา	56
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน	58
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน	58

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับการรั่วไหลของอลูมิน่าของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน	59
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28วัน	59
ฉ.1	ลักษณะการหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร	97
ฉ.2	ลักษณะการหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาขนาด 20 x 20 x 3 เซนติเมตร	97

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในการก่อสร้างปัจจุบันมีวัสดุที่ได้รับการพัฒนาเพื่อให้ทำงานได้รวดเร็วอย่างมากมาย เช่น การก่อสร้างผนังจากอดีตที่เคยสร้างผนังโดยการหล่อคอนกรีตและการก่ออิฐมอญมาเป็นการใช้อิฐมวลเบาเนื่องจากอิฐที่นิยมใช้ในการก่อผนังได้แก่ อิฐมอญ อิฐบล็อก มีน้ำหนักมากประมาณ 180 กิโลกรัม/ตารางเมตร ทำโครงสร้างมีขนาดใหญ่หรือต้องเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาอิฐมวลเบาขึ้นเพื่อเป็นการลดน้ำหนัก ของผนังที่มีผลต่อโครงสร้าง แต่คอนกรีตมวลเบาในปัจจุบันมีต้นทุนในการผลิตสูงเนื่องจากต้องผ่านกระบวนการอบไอน้ำและใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานในการผลิต แต่ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานความร้อนในการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2)สู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณมากก่อให้เกิดผลกระทบด้านต่าง ๆ ต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันจึงมีการศึกษาวิจัยโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร และอุตสาหกรรมที่มีกระบวนเตรียมก่อนที่จะนำมาใช้ที่ใช้พลังงานต่ำ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาส่วนใหญ่ต้องใช้ผงอลูมิเนียมเป็นสารเพิ่มฟองอากาศ ในขณะที่กระบวนการผลิตอลูมิเนียมจากสินแร่นั้นต้องใช้พลังงานกระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูงเฉลี่ยประมาณ 15,141 กิโลวัตต์/ชั่วโมงต่อการผลิตอลูมิน่า 1 เมตริกตัน [1] และต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงทำให้ต้นทุนของอลูมิเนียมที่ใช้มีราคาสูง ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยโดยใช้กากของเสียที่มีการปนเปื้อนอลูมิเนียม มาใช้แทนอลูมิเนียมบริสุทธิ์เพื่อลดต้นทุนการผลิต [2]โดยกากของเสียที่มีการปนเปื้อนอลูมิเนียมเกิดจากอุตสาหกรรมหลอมหล่อเศษและตะกรันอลูมิเนียม ซึ่งมีทั้งโรงหลอมขนาดเล็กที่มีชาวบ้านเป็นผู้ดำเนินกิจการไปจนถึงโรงหลอมขนาดใหญ่ที่มีนักลงทุนเป็นผู้ดำเนินกิจการปริมาณของเสียจากการหลอมอลูมิเนียมของโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยประมาณ 80,000 ตัน/ปี [3] โดยในกระบวนการหลอมอลูมิเนียมที่นำอลูมิเนียมที่ผ่านการใช้แล้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตนั้นจะมีฝุ่นขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งถูกดักจับไว้ในอุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบถุงผ้ากรอง หรือเครื่องเก็บฝุ่นแบบไซโคลน โดยฝุ่นดังกล่าวมีอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบในขั้นตอนการกำจัดเนื่องจากโรงงานส่วนใหญ่เป็นโรงงานขนาดเล็กทำให้มีการลักลอบทิ้งรวมขยะ หรือฝังกลบอย่างไม่ถูกวิธีซึ่งทำให้เกิดผลกระทบด้านต่าง ๆ ต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการนำกากตะกรันอลูมิเนียมที่เป็นกากของเสียมาแทนที่อลูมิเนียมบริสุทธิ์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาและ ได้นำของเสียจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมที่มีความเป็นวัสดุปอซโซลานได้แก่ เถ้าแกลบขาวและเถ้าลอยตามลำดับมาแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตขึ้นได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น การดูดกลืนน้ำ การรั่วไหลของอลูมิเนียมด้วยวิธี TCLP และการนำความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำงานวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้กากตะกรันอลูมิเนียมเป็นสารเพิ่มฟองอากาศและที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาวและเถ้าลอย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาว และเถ้าลอยต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมกากตะกรันอลูมิเนียม เป็นการวิจัยเชิงทดลองซึ่งศึกษา โดยมีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

1) ปริมาณของกากตะกรันอลูมิเนียมที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
2) ชนิดของวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ เถ้าแกลบขาว และเถ้าลอย
3) ปริมาณของวัสดุปอซโซลานได้แก่ ปริมาณร้อยละ 0 และ 50 โดยน้ำหนัก
4) ปริมาณของปูนขาวที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
5) สมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ทำการศึกษาประกอบด้วย
   - สมบัติทางกลได้แก่ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน
   - สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นและการดูดกลืนน้ำที่อายุ 28 วัน
   - สมบัติการนำความร้อนที่อายุ 28 วัน
   - การรั่วไหลของอลูมิน่าด้วยวิธี TCLP ที่อายุ 28 วัน

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตมวลพรุน

คอนกรีตมวลเบาเริ่มมีการค้นคว้าและพัฒนาในแถบยุโรปเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2466 และได้มีการผลิตเพื่อจำหน่ายในปี พ.ศ. 2473 เนื่องจากสมบัติเด่นของวัสดุซึ่งมีน้ำหนักเบา ทำให้ประหยัดโครงสร้างและมีความเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งคอนกรีตมวลเบาผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย ยิปซัม ปูนขาวผสมกับน้ำ และผงอลูมิเนียม สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามกระบวนการผลิต คือ คอนกรีตมวลเบาแบบไอน้ำและคอนกรีตมวลเบาแบบไม่อบไอน้ำ

2.1.1 คอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Non-Autoclaved System)

คอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดัน สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ [4]

ประเภทที่ 1 ใช้วัสดุเบากว่ามาทดแทน เช่น ขี้เลื่อย ขี้เถ้า ชานอ้อย หรือเม็ดโฟมทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาขึ้น

ประเภทที่ 2 ใช้สารเคมี (Circular Lightweigth Concrete) เพื่อทำให้เนื้อคอนกรีตฟูและทิ้งให้แข็งตัว

2.1.2 คอนกรีตมวลเบาที่ผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclaved System)

แบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้ 2 ประเภท ซึ่งกระบวนการผลิตทั้ง 2 ประเภท นั้นจำเป็นต้องใช้องค์ประกอบทางเคมีจาก CaO ซึ่งต้องมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 22 ต่อน้ำหนักหน่วยของการออกแบบการผสมซึ่ง CaO นั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญมากของคอนกรีตมวลเบา

ประเภทที่ 1 Lime Base วัตถุดิบหลักคือปูนขาว การใช้ปูนขาวในการผลิตนั้นจะไม่สามารถควบคุมคุณภาพในการผลิตได้

ประเภทที่ 2 Cement Base ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เป็นระบบที่นอกจากจะช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพได้มาตรฐานสม่ำเสมอแล้ว ยังช่วยให้เกิดการตกผลึกของ (Calcium Silicate) ในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแข็งแกร่ง ทนทาน และในการผลิตนั้นสามารถใช้วัสดุปอซโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์เนื่องจากวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่ไม่มีสมบัติยึดประสานในตัวของวัสดุเอง ซึ่งจะต้องมีสารละลายที่มีความเป็นด่างมาผสม จึงจะทำให้วัสดุปอซโซลานมีความสามารถในการยึดประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์

2.1.3 กรรมวิธีการผลิตคอนกรีตพรุน

การผลิต Autoclaved Concrete (AAC) [6] แบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

2.1.3.1 วิธีทางเคมี (Chemical aerating Method) เป็นวิธีที่ใส่สารเคมีลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาในเนื้อคอนกรีต เกิดฟองอากาศจำนวนมาก วิธีนี้คล้ายกับการใส่ผงฟูในขนมเค้ก ทำให้ขนมเค้กฟู วิธีทางเคมีนี้จะใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์การผลิตสูงมาก ทำให้คอนกรีตมวลเบาที่ได้มีคุณภาพดีสม่ำเสมอ และมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 20-40 ของคอนกรีตปกติ จึงได้รับความนิยมมาก สำหรับวิธีทางเคมีสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. Hydrogen Peroxide and blcaching powder method วิธีนี้เป็นวิธีการ ทำให้เกิดก๊าซออกซิเจนในเนื้อคอนกรีตดังสมการ 2.1

$$\underset{\text{Bleaching Powder}}{CaCI(OCI)} + \underset{\text{Hydrogen Peroxide}}{H_2O_2} \longrightarrow \underset{\text{Calcium Chloride}}{CaCl_2} + \underset{\text{Oxygen}}{O_2} + \underset{\text{Water}}{H_2O} \qquad (2.1)$$

จากรูปแบบสมการเคมีข้างต้นนี้ จะเห็นว่าเป็นการใช้สารผงฟอกสี (Bleaching powder) ทำปฏิกิริยากับ Hydrogen Peroxid มีผลทำให้เกิดฟองน้ำและก๊าซออกซิเจนในเนื้อคอนกรีต

2. Aluminum Powder method เป็นวิธีที่ใส่สารเคมีให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีในเนื้อคอนกรีตทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อคอนกรีต ซึ่งเกิดปฏิกิริยาเคมีดังสมการข้างล่างนี้

$$\underset{\substack{\text{Aluminum} \\ \text{Powder}}}{2AI} + \underset{\substack{\text{Hydrated} \\ \text{lime}}}{3Ca(OH)_2} + 6H_2O \longrightarrow \underset{\substack{\text{Tricalcium aluminate} \\ \text{hydrate}}}{3CaOAI_2O_3 36H_2O} + \underset{\text{Hydrogen}}{3H_2} \qquad (2.2)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลอลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับ Ca (OH) $_2$ มีผลก่อให้เกิดฟองก๊าซของไฮโดรเจน

2.1.3.2 วิธีทางกล (Mechanicl Methol or mixture) เป็นวิธีที่ทำให้เกิดโฟมขึ้นก่อนแล้ว นำโฟมนี้ไปผสมคอนกรีตทันที เมื่อคอนกรีตแข็งตัวก็จะได้คอนกรีตที่มีฟองอากาศจำนวนมาก ทำให้มีน้ำหนักเบา วิธีนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมเพราะราคาแพงและคุณภาพของคอนกรีตเบาที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับฝีมือในการผสมคอนกรีต วิธีการผลิตโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี

Excess Water Methol เป็นการผสมโดยใช้ปริมาณน้ำมากเกินพอที่ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ ทำโดยผสมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ให้ใช้น้ำมากๆและทำการผสมหลายครั้งซึ่งจะทำให้ปริมาณน้ำจำนวนมาก เมื่อนำไปบ่มด้วยไอน้ำความดันสูงให้แห้งและเรียกว่า "Light Lime Concrete" เพราะว่าใช้ปูนขาวเป็นตัวเชื่อม

Air Entraining Agent เป็นวิธีโม่ส่วนเหลวๆกับสารกักกระจายฟองอากาศทำให้เกิดฟองในลักษณะเดียวกับการตีไข่ข่าว โดยที่การผสมจะใช้เครื่องผสมที่เป็นใบพัดหมุนในแนวราบ (Horizontl Propeller-Typ Mixers) และภายในเครื่องยังประกอบด้วยลวดตะแกรงยาว ¼ นิ้ว หมุนด้วยความเร็ว 55-60 รอบต่อนาที

Preformet foam Method ฟองอากาศที่ได้จากวิธีนี้โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับสารกระตุ้นพวกโปรตีนหรือสารเคมีอื่นๆ

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์เป็นคำที่มาจากภาษาละติน หมายถึง สารที่สามารถยึดหรือประสานของแข็ง หรือมวลรวม เช่น หินหรือกรวด และทราย ให้แข็งติดเป็นชิ้นเดียวกัน นิยมใช้ในงานก่อสร้างเป็นหลัก โดยมีการนำปูนซีเมนต์ไปใช้งาน ทั้งในรูปของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต โดยซีเมนต์เพสต์คือส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับน้ำ และอาจมีสารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีตด้วย มอร์ต้า คือส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์กับทราย และคอนกรีต คือ ส่วนผสมของมอร์ต้ากับหินหรือกรวด

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

เมื่อทำการปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนหรือดินสอพองเหลือเพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3 เกิดจากการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียม (จากหินปูนหรือดินสอพอง) กับซิลิกา อลูมินา และเหล็ก (จากดินดำหรือดินเหนียวหรือดินดาน)

ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยกระบวนการตกผลึก เมื่อมีการทำให้เย็นลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO SiO_2, Ai_2O และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์
- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, Na_2O, K_2O, Tio_2, P_2O_5 และยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนเซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7]

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 - 67
SiO_2	17 - 25
Ai_2O_3	3 - 8
Fe_2O_3	0.5 - 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 5.5
Na_2O+K_2O	0.5 - 1.3
TiO_2	0.1 0.4
P_2O_5	0.1 0.2
SO_3	1 - 3

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญ 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7]

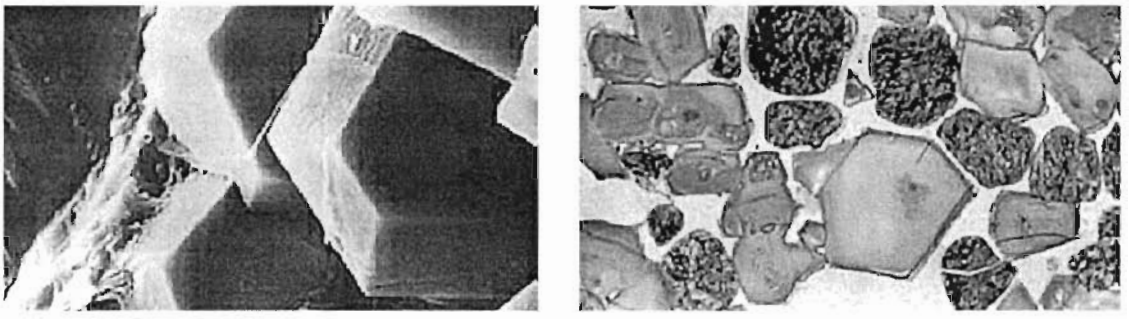
ชื่อสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicte)	$3CaO.SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Aluminate)	$2CaO.SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3CaO.Ai_2O_3$	C_3A
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรด์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4CaO.Ai_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

2.2.2 สมบัติของสารประกอบหลัก

สมบัติของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด [7] มีผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนี้

2.2.2.1 ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S หรือ Alite)

C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีอ่อนกว่า C_2S ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สมบัติของ C_3S จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก ดังแสดงในรูป 2.2 โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อร้อยละของ C_3S เพิ่มขึ้น โดยปริมาณยิปซัมจะมีผลต่อกำลังของ C_3S ด้วย ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3S อยู่ประมาณร้อยละ 50-70 ดังแสดงในตารางที่ 2.3

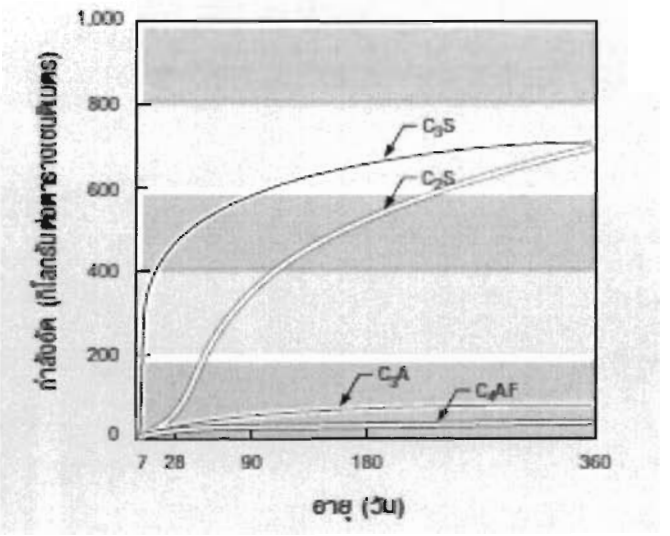


(a) (b)

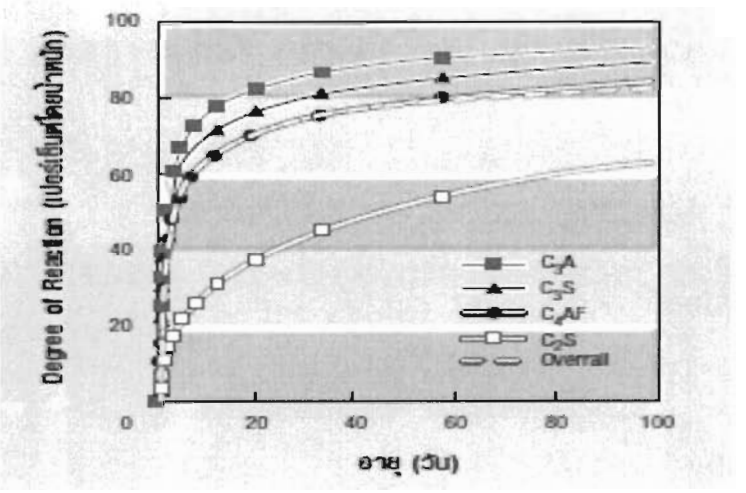
รูปที่ 2.1 รูปร่างของ C_3S ซึ่งเป็นผลึก 6 เหลี่ยม และ C_3S เป็นเม็ดกลมสีดำ [7]

a) ผลึก C_3S (Alite) ในรูปเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่อง Scanning Elcctron (SEM) (ขาย 3,000 เท่า)

b) ส่วนประกอบของปูนเม็ด ประกอบด้วย C_3S (Alite) ซึ่งมีสีอ่อนกว่าและรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ส่วนผลึกที่มีลักษณะกลมและมีสีทึบ คือ C_2S (Beline) (ขยาย 4,000 เท่า)



a)



b)

รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7]

a) กำลังอัดของสารประกอบหลัก

b) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

ตารางที่ 2.3 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักของปูนเม็ด [7]

สารประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละของปูนเม็ด)
C_3S (Alite)	50-70
C_2S (Beline)	15-30
C_3A	5-10
C_4AF (Celite)	5-15

2.2.2.2 ไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S หรือ Beline)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแต่มีเพียง βC_2S เท่านั้นที่มีความเสถียร ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวและเกิดความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวแล้วจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ ในช่วงแรก และกำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอายุมากกว่า 7 วัน แต่ในระยะยาวได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_2S ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_2S อยู่ประมาณ 15-30

2.2.2.3 ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงไปในขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำหน้าที่หน่วงการก่อตัวเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ C_3A และจะพัฒนากำลังอัดในช่วง 1-2 วัน แต่มีค่ากำลังค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ประมาณ 5-10 นอกจากนี้ยังพบว่า ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำกว่า จะสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดีกว่า

2.2.2.4 เตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF หรือ Celite)

C_4AF เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนซีเมนต์และจะมีผลต่อสีของปูนซีเมนต์ โดยทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา C_4AF มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม ค่ากำลังอัดของ C_4AF มีค่าต่ำและไม่แน่นอน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ประมาณ 5-15

2.2.3 สมบัติของสารประกอบรอง

2.2.3.1 ยิปซั่ม (Gypsum หรือ Calcium Suphate หรือ $CaSO_4 \bullet 2H_2O$)

ยิปซั่มเป็นหนึ่งในสามรูปแบบของสารประกอบคัลเซียมซัลเฟต ได้แก่

- ยิปซั่ม (Gypsum หรือ Calcium Suphate หรือ $CaSO_4 \bullet 2H_2O$)
- Anhydrite (หรือ Anhydrous Calaium Sulphte หรือ $CaSO_4$)
- Plaster หรือ Hemihydrte (หรือ plaster of paris หรือ Bassanite หรือ Calcium Sulphte Hemihydrate หรือ $CaSO_4 \bullet 0.5_2o$)

โดยจะมีการเติมยิปซั่มในระหว่างการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A เป็น Ettringite (Calcium Trisulphoaluminate) เพื่อหน่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A หรือเป็นการควบคุมระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ถ้าไม่ได้เติมยิปซั่ม ปูนซีเมนต์จะเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ปริมาณยิปซั่มที่ใส่

ต้องเหมาะสม เพื่อให้ปูนซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุด และเกิดการหดน้อยที่สุดโดยปริมาณยิปซั่มที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- ปริมาณอัลคาไลออกไซด์ ได้แก่ Na_2O และ K_2O
- ปริมาณ C_3A
- ความละเอียด (Fineness) ของปูนซีเมนต์

นอกจากนี้จะต้องมีการควบคุมปริมาณยิปซั่มที่ใส่ไม่ให้มากเกินไป เพราะอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการเกิด Ettringite มากเกินไป

2.2.3.2 Free Line (CaO)

Free Line สามารถเกิดได้ 2 กรณี ได้แก่

- เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป แต่ทำปฏิกิริยากับ SiO_2 Ai_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด
- เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป แต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆไม่สมบูรณ์ Free Line จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆหลังจากที่ปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดการขยายปริมาตร ที่อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "ความไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime (Unsoundness Due to Lime)"

นอกจากปริมาณ CaO ที่มีผลต่อความไม่อยู่ตัวแล้ว ขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของปูนซีเมนต์ก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลเช่นกัน

2.2.3.3 แมกนีเซียมออกไซด์ หรือแมกนีเซีย (Mgnesium Oxide หรือ Magneia หรือ MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์โดยปกติจะมี $MgCO_3$ เมื่อเผาจะเกิดการแยกตัวเป็น MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเหลวเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปในผลึก Periclasc (MgO) ซึ่งเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชั่น จะเหมือกับ CaO คือ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness) และอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้ การขยายตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์
- ขนาดของ MgO

ความไม่อยู่ตัวของ MgO จะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก เพราะถ้าผลึกมีขนาดเล็ก ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก็จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วที่อุณหภูมิปกติ MgO จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ช้ามากโดยใช้เวลานานเป็นปีๆ ดังนั้น การทดสอบการขยายตัวในช่วงเวลา

สั้นๆ จึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้จึงได้นำวิธีการของ Autoclave มาใช้ในการทดสอบการขยายตัว อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถวัดค่าการขยายตัว อันเกิดจาก CaO และ MgO ได้อีกด้วย

2.2.3.4 อัลคาไลออกไซด์ (Alkli Oxides หรือ Na_2O . K_2O)

อัลคาไลออกไซด์ ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลหรือด่างในปูนซีเมนต์มาผสมเป็นคอนกรีต จะทำให้เกิด "ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali – Aggregate Rcaction หรือ AAR)" ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยาอัลคาไล ควรเลือกใช้ปูนที่มีอัลคาไลต่ำ กล่าวคือ ปริมาณอัลคาไลในปูนซีเมนต์ หรือ Total Alkalis (หรือ Eq.Na_2O) จะต้องไม่เกิน 0.6% โดยสามารถคำนวณหาค่า Total Alkalis ได้จากสูตร

$$\text{Total Alkalis} = Na_2O+0.658(K_2O) \qquad (2.3)$$

2.2.4 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทของปูนซีเมนต์ตามลักษณะการใช้งาน แบ่งออก 3 กลุ่ม หลักๆได้แก่

- ปูนซีเมนต์สำหรับงานโครงสร้างและงานหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีต เช่น ปูนตราช้าง ปูนตราช้างรับกำลังอัดเร็ว, ปูนตราช้างทนซัลเฟตสูง, ปูนตราช้างทนน้ำเค็ม ดินเค็ม , และปูนตราช้างงานหล่อ เป็นต้น
- ปูนซีเมนต์สำหรับงานก่อ งานฉาบ เช่น ปูนตราเสือ , ปูนตราแรด , และปูนตราเสือพลัส เป็นต้น
- ปูนซีเมนต์สำหรับงานพิเศษ เช่น ปูนตราช้างขุดเจาะน้ำมัน, ปูนซีเมนต์ขาวตราช้างเผือก และปูนซีเมนต์ขาวตราเสือ เป็นต้น

ตามมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของประเทศไทย คือมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ มอก. 15 เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ด้วยกันได้แก่

1. ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
2. ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง
3. ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูง
4. ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ
5. ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง

มาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของสหรัฐอเมริกา คือ ASTM C 150 [8] ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 8 ประเภท ซึ่งนอกจากประกอบด้วยปูนซีเมนต์ทั้ง 5 ประเภท ข้างต้นแล้ว ยังมีประเภทกระจายกักฟองอากาศอีก 3 ประเภท ได้แก่ ประเภท 1A , ประเภท 2A , และประเภท 3A

2.3 ปูนขาว (Lime)

ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยนำมาเป็นวัสดุยึดประสานในการก่อสร้างอาคารหรือถนนมาตั้งแต่สมัยกรีก โรมัน และอียิปต์โบราณ โดยทั่วไปนิยามของปูนขาว คือ สารที่มีองค์ประกอบของออกไซด์และไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียมและแมกนีเซียม เป็นผลผลิตที่ได้มาจากการเผาหินปูน มีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) สามารถขุดพบหินที่ใช้ผลิตปูนขาวได้ทั้งในสภาพที่บริสุทธิ์และไม่บริสุทธิ์ ปูนขาวสามารถแบ่งตามลักษณะทางเคมีได้ 2 ประเภท [9] คือ Quick Lime และ Hydrated Lime

2.3.1 Quick Lime

ปูนสุก (Quick Lime) คือ ปูนขาวที่มี Calcium Oxide (CaO) เป็นส่วนประกอบหลักและมี Magnesium Oxide (MgO) เป็นส่วนประกอบรองปูนสุก สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท

1. High Calcium Quicklime (CaO)
2. Dolomitic Calcium Quicklime (CaO+MgO)

กรรมวิธีในการผลิต คือ การเผา Limestone โดยใช้อุณหภูมิขจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ที่มีอยู่ใน Limestone ให้เหลือแต่ Limestone CaO ดังสมการ

$$CaCO_3 \xrightarrow{1650\ ^\circ F} CaO+CO_2 \qquad (2.4)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า จะต้องใช้อุณหภูมิในการเผา Limestone สูงถึง 1650 องศาฟาเรนไฮน์ (900 องศาเซเซียส) จึงทำให้ Limestone แตกตัวออกเป็น CaO และ CO_2 แต่ในบางครั้งอาจต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาฟาเรนไฮน์ (1100 องศาเซลเซียส) เพื่อให้ Calcitic Limestone เกิดการแตกตัว ส่วนกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต Dolomitic Quicklime คือ การเผา Dolomitic Quicklime ที่อุณหภูมิ 1350 องศาฟาเรนไฮน์ (750 องศาเซลเซียส) ทำให้ได้ MgO และ CO_2 แต่อาจจะต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาฟาเรนไฮน์ (1100 องศาเซลเซียส) เพื่อให้เกิดการแตกตัวของ CO_2 ที่สมบูรณ์เต็มที่ดังสมการ

$$CaMg(CO_3)_2 \xrightarrow{1350\ ^\circ F} MgO+CaCO_3+CO_2 \quad (2.5)$$

$$MgO+ CaCO_3 \xrightarrow{2000\ ^\circ F} MgO+CaO+ CO_2$$

ปูนสุก เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ผลของปฏิกิริยาจะทำให้ปูนสุกแตกตัวออกเป็น Hydrated Lime หรือ Slake Lime และมีความร้อนเกิดขึ้นดังสมการ

$$CaO+H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2+65.3KJ/mol \quad (2.6)$$

ในกระบวนการผลิตนอกจากจะให้ความร้อนแล้ว ยังทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของปูนสุกเป็นขาว ทำให้สมบัติต่างๆเปลี่ยนแปลงไป Hcrrin และ Mitchell ได้แสดงสมบัติของปูนสุกและปูนขาวดังแสดงในตารางที่ 2.4 สมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และสมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.4 สมบัติของปูนสุกและปูนขาว [9]

Characteristic	Quick Lime	Water	Hydrated Lime
Molecular Weight	56	18	78
Specific Gravity	3.3	1	2.2
Relative Weight	1	0.32	1.32
Relative Volume	1	-	1.99

ตารางที่ 2.5 สมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์ [9]

PROPERTIES OF THEORETICALLY PURE LIMES				
Characteristic	**Quick Lime**		**Hydrated Lime**	
Chemical Name	**Calcaim or Calcium Oxide**	**Magnesia or Magnesium Oxide**	**Caleium Hydroxide**	**Magnesium Hydroxide**
Chemical Formula	CaO	MgO	$Ca(OH)_2$	$Mg(OH)_2$
Crystalline From	Cubic	Cubic	Hexagonal	Hexagonal
Melting Point	2570°C	2800°C	-	-

ตารางที่ 2.5 สมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์ [9] (ต่อ)

PROPERTIES OF THEORETICALLY PURE LIMES				
Characteristic	**Quick Lime**		**Hydrated Lime**	
Chemical Name	**Calcaim or Calcium Oxide**	**Magnesia or Magnesium Oxide**	**Caleium Hydroxide**	**Magnesium Hydroxide**
Decomposition Point	-	-	580°C	345°C
Boiling Point	2850°C	3600°C	-	-
Heat of Solution at 18°C	+18.33 kg-cal	-	+2.79 kg-cal	+0.0 kg-cal
Molecular Weight	56.09	40.32	74.10	58.34
Specific Gravite	3.40	3.65	2.34	2.40

ตารางที่ 2.6 สมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม [9]

PROPERTIES OF COMMERCIL LIMES		
(a) Quick Lime		
Chemical Composition	**Hight Calcium (%)**	**Dolomitic (%)**
CaO	92.25-98.00	55.00-57.50
MgO	0.30-2.25	37.60-40.80
CO_2	0.40-1.50	0.40-1.50
SIO_2	0.20-1.50	0.10-1.50
Fe_2O_3	0.10-0.40	0.05-0.40
$Ai2O_3$	0.10-0.50	0.05-0.50
H_2O	0.10-0.90	0.10-0.90
Specific Gravite	3.20-3.40	3.20-3.40
Specific Heat at 100oF,Btu/ib	0.19	0.21
Bulk Density (People Lime),pcf	55.00-60.00	55.00-60.00

ตารางที่ 2.6 สมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม [9] (ต่อ)

PROPERTIES OF COMMERCIL LIMES			
(a) Quick Lime			
Chemical Composition	**Hight Calcium (%)**	**Dolomitic (%)**	
(b) Hydrated Lime			
Characteristic	**High Calcium**	**Mono Hydrated Dolomitic**	**Dihydrate Dolomitic**
PrincipleChemical Composition	$Ca(OH)_2$	$Ca(OH)_2+MgO$	$Ca(OH)_2+(OH)_2$
Specific Gravity	2.30-2.40	2.70-2.90	2.40-2.60
Specific Heat at 100° F,Btu/lb	0.29	0.29	0.29
Bulk Density,pcf	25.00-3.00	25.00-35.00	30.00-40.00

2.3.2 Hydrated Lime

เมื่อปูนสุกรวมกับตัวน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydrations กลายเป็นปูนขาว จำแนกได้ 3 ประเภท คือ

1. Hydrate high-Calcium Lime,$Ca(OH)_2$
2. Normal hydrate or Monohydrate Dolomitic Lime, $Ca(OH)_2+MgO$
3. Predure hydrate or Dihydrate Lime, $Ca(OH)_2+Mg(OH)_2$

ขนาดอนุภาคของปูนขาวจะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ 1 ใน 10 เท่า ของขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์

ปูนขาวประเภท Hydrated Lime จะนิยมใช้กันกว้างขวางกว่าประเภท Quick Lime ทั้งนี้เป็นเพราะ Hydrated Lime เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะคลายความร้อนออกมาน้อยกว่า มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนเครื่องจักร และเป็นอันตรายต่อผู้ใช้น้อยกว่า Quick Lime ส่วนรายละเอียดของสมบัติและสารประกอบของปูนขาวแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สมบัติและสารประกอบของปูนขาวแต่ละชนิด [9]

Characteristic	Lime	
	Quick Lime	Hydrated Lime
CaO+MgO	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 92	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95
CO2-at Kiln	ไม่มากกว่าร้อยละ 3	ไม่มากกว่าร้อยละ 5
-elsewhere fineness	ไม่มากกว่าร้อยละ 10	ไม่มากกว่าร้อยละ 7

2.4 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา หรือซิลิกาอลูมินา มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่อุณหภูมิปกติร่วมกับความชื้น ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสานนั่น คือ แคลเซียมซิลิเดรต (Clacium Silicate Hydrate) เพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า "ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)" [6,10] การใช้วัสดุปอซโซลานอาจใช้อยู่ในรูปของสารผสมเพิ่มในคอนกรีต เช่น คอนกรีตปอซโซลาน (Pozzolanic Concret) เป็นต้น หรืออาจใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมสารปอซโซลานก็ได้ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland – Pozzolanic Concrete) เป็นต้น

การใช้สารปอซโซลานโดยทั่วไป จะช่วยเพิ่มความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสดที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อยู่น้อย มีผลทำให้กำลังแรงอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่กำลังจะสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอายุมากกว่า 28 วัน และยังช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อสารเคมีสูงขึ้น เพราะปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลง นอกจากนี้สารปอซโซลานยังช่วยลดปริมาณและอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้สามารถใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมสารผสมเพิ่มชนิดนี้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 สำหรับงานคอนกรีตหลา (Mass Concrete)

สมบัติของคอนกรีตผสมสารปอซโซลานจะขึ้นอยู่กับประเภทและปริมาณสารปอซโซลานในส่วนผสมคอนกรีต การบ่ม และอุณหภูมิ การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตอาจจำเป็นต้องมีการทดลองผสม ต้องควบคุมการบ่มให้ได้ดีและนานกว่าคอนกรีตที่ปูนซีเมนต์ล้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 3 วันแรก และควรทดสอบคุณภาพคอนกรีตก่อนใช้งานจริงด้วยปริมาณการใช้ย่อมขึ้นอยู่กับประเภท

และลักษณะงานโครงสร้าง และชนิดรวมทั้งคุณสมบัติของสารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอยซิลิก้าฟูม วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ และ Metakaolin เป็นต้น

- เถ้าลอย (Coal Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash หรือ PEA) เป็นเถ้าอนินทรีย์ที่เหลือมาจากการเผาถ่านหิน วัสดุนี้เป็นที่นิยมมากเพราะมีลักษณะเป็นผงละเอียดอยู่แล้ว เถ้าลอยที่มีคุณสมบัติที่ดีจะสามารถใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต เช่น เพิ่มความสามารถในการเทได้ ลดปริมาณน้ำ ลดปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เพิ่มกำลังในระยะยาว ลดการหดตัว เพิ่มความทึบน้ำและเพิ่มความคงทนต่อสารเคมี เป็นต้น แต่เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดและแหล่งของถ่านหินและกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้น เถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตจึงควรมีคุณสมบัติสอดคล้องกับข้อกำหนด

- ซิลิกาฟูม (Silica Fume หรือ Microsilica) คือสารปอซโซลานประเภทหนึ่งที่ได้จากกระบวนการผลิต Silicon Alloy เนื่องจากซิลิกาฟูมมีลักษณะเป็นผงที่มีความละเอียดสูงมากกว่าปูนซีเมนต์มาก ทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการในคอนกรีตเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) โดยสามารถใช้ผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต เช่น เพิ่มกำลังในคอนกรีตกำลังสูง ลดการเยิ้ม ลดการแยกตัว เพิ่มความทึบน้ำและเพิ่มความคงทนต่อสารเคมี เป็นต้น

- วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) คือ วัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ เช่น เถ้าภูเขาไฟและหิน Tuff, Pumicite, Opaline, Chert, ดินเหนียว และหิน Shale เป็นต้น โดยปกติต้องนำมาบดให้ละเอียดและเผา

- Metakaolin เป็นสารปอซโซลานประเภทหนึ่งที่ได้จากดิน Kaolin ซึ่งผ่านกระบวนการ Calcined และเผาที่อุณหภูมิสูง เป็นลักษณะที่เป็นผลที่มีความละเอียดสูงมากกว่าปูนซีเมนต์มากและกระจายตัวในน้ำได้ดีกว่าซิลากาฟูม สามารถใช้ผสมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต เช่น เพิ่มกำลังในคอนกรีตกำลังสูง ช่วยทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากขึ้น เพิ่มความทึบน้ำ และเพิ่มความคงทนต่อสารเคมีเป็นต้น

2.4.1 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)

เถ้าแกลบเป็นผลผลิตที่ได้จากการเผาแกลบ ที่อุณหภูมิเหมาะสม และนำเถ้าแกลบที่เผาและเย็นตัวลงมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดก็จะได้เถ้าแกลบที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ โดยในการเผาแกลบแบบเปิดนั้น จะมีซิลิกาอยู่ในรูปผลึกที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาน้อยมาก เช่น Critabolite Tridymite แต่ก็มีบางส่วนที่ละเอียดมาก และมีสมบัติคล้ายสารปอซโซลาน ส่วนการเผาแบบปิดหรือควบคุมการเผาไหม้นั้น จะได้ขี้เถ้าแกลบที่มีสมบัติเป็นปอซโซลานที่ไวต่อปฏิกิริยาคือเป็นซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็น Celluler ซึ่งไม่เป็นผลึก และมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำเถ้าแกลบมาใช้ประโยชน์ พบว่า ถ้านำแกลบข้าวไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง จะพบว่าเถ้า

แกลบจะมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์และเหล็กออกไซด์รวมกันถึงร้อยละ 93.76 ขององค์ประกอบทั้งหมด [6] และองค์ประกอบหลักดังกล่าวแล้ว ขี้เถ้าแกลบยังมีส่วนประกอบของ แมกนิเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และโปรแตสเซียมออกไซด์ปนอยู่ด้วย ซึ่งบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบ [6]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละของสารประกอบ
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	93.15
อลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3)	0.14
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	0.20
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.41
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.45
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.08
โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O)	2.31
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้	2.77

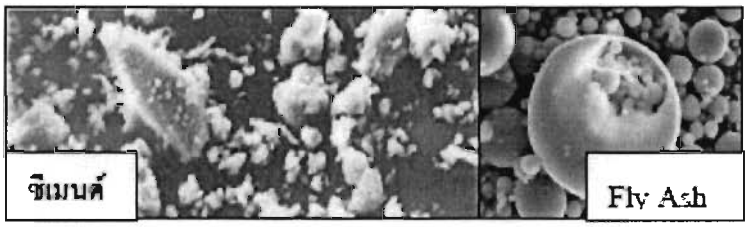
2.4.2 เถ้าลอย Pulverized Fuel Ash (PFA)

การวิจัยและพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตประเภท อื่นๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ คือต้องการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลวใช้ในการเท และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ใช้ในการรับกำลังอัด และที่สำคัญยิ่งคือต้องการได้คอนกรีตที่มีความทนทานรวมทั้งมีราคาเหมาะสม ซึ่งหนึ่งในนั้น คือ เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash [PFA])การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ประโยชน์โดยตรง คือ การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นแล้ว ยังประโยชน์ทางอ้อม คือการนำของเสีย (Waste) มาใช้ซึ่งช่วยขจัดปัญหาเรื่องมลภาวะที่ เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับ (Electrostatic Precipitator) จะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป

2.4.2.1 ความละเอียดของเถ้าลอย

Pulverized Fuel Ash (PFA) เป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียดเทียบกับอนุภาคของซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ดังรูปที่2.3 ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่

บดละเอียด (Pulverized Coal) ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าและถูกจับด้วยเครื่องดักจับ (Precipitator)หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถังเก็บ ซึ่งถ่านหินที่นำมาใช้ทำเชื้อเพลิงประกอบด้วยสารประกอบคาร์บอนและแร่ธาตุอื่นๆ เช่น ดินดาน, ดินเหนียว, ซัลไฟด์ และคาร์บอน เมื่อถูกเผาในอุณหภูมิสูงในเตาเผาคุณสมบัติของสารประกอบต่างๆ ในถ่านหินจะเปลี่ยนไปทั้งด้านกายภาพและด้านเคมี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งวิธีการทำให้เย็น PFA ที่ได้จากการเผานี้ ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิก้าและอลูมินา ที่คอนกรีตมวลเบาต้องการ



รูปที่ 2.3 อนุภาคของซีเมนต์ เทียบกับอนุภาคของ เถ้าลอยบดละเอียด [11]

เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 mm) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.15 mm) การวัดความละเอียดของเถ้าถ่านหินมี 2 วิธีที่นิยมใช้กันคือ วิธีการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 หรือช่องเปิด 45 ไมโครเมตร กับวิธีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยใช้วิธีของ Blaine ทั้ง 2 วิธีเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เถ้าถ่านหินในแม่เมาะมีลักษณะเป็นฝุ่นผงสีเทา เทาดำ หรือน้ำตาลในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ผลสรุปสมบัติของ เถ้าลอย เทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 [12]

คุณสมบัติ	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1	เถ้าลอย (PFA)
ความหนาแน่น (ตร.ซม./กรัม)	3,400 ตร.ซม./กรัม	3,800 ตร.ซม./กรัม
ความหนาแน่น (กก.ลบ.ม.)	1400 กก.ลบ.ม.	900 กก.ลบ.ม.
ความถ่วงจำเพาะ(กก.ลบ.ม.)	3.15 กก.ลบ.ม.	2.30 กก.ลบ.ม.
สี	เทา	เทาอ่อน-เทาเข็ม,น้ำตาล

2.4.2.2 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหินคือ ซิลิกอนไดอ๊อกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมไตรอ๊อกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอร์ริคอ๊อกไซด์ (Fe_2O_3) อัตราส่วนอ๊อกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ, สภาพแวดล้อมขณะเผา, และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C 618 จึงได้แยกประเภทของเถ้าถ่านหินไว้ 2 ชนิด คือ Class F และ Class C โดย Class F มีปริมาณ SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักและ Class C จะมีปริมาณ SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 ระหว่างร้อยละ 50-70โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่แล้วถ่านหินลิกไนท์ (Lignite), สับบิทูมินัส (Subbituminus) ให้เถ้าถ่านหินClass C ส่วนถ่านหินชนิดแอนทราไซด์ (Anthracite), บิทูมินัส (Bituminous) จะให้เถ้าถ่านหิน ClassF สำหรับที่โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อ. แม่เมาะ ใช้เถ้าถ่านหินลิกไนท์เป็นวัตถุดิบในการให้ความร้อน

2.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

การก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์ [7] โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้น 2 ลักษณะ คือ

- อาศัยสารละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลาย และ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

- การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า "Solid Steat Reaction" ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ผลิตภัณฑ์ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้น ในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์

2.5.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

คัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด "คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) หรือ $3CA{\cdot}2SIO_2{\cdot}3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$ หรือ CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรง ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3S

$$2(3CaO{\cdot}SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O+3Ca(OH)_2 \qquad (2.7)$$

หรือ $2C_3S+6H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3+3Ca(OH)_2$

สมการของ C_2S

$$2(2CaO{\cdot}SiO_2)+4H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O+ Ca(OH)_2 \qquad (2.8)$$

หรือ $2C_2S+4H_2O \rightarrow C_3S_2H_3+3Ca(OH)_2$

จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะเกิด Gel เมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะ 2 ประการ คือ มีรูพรุนและโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ โดยองค์ประกอบทางเคมี CSH ขึ้นกับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างมาก คือ pH ประมาณ 12.5 ซึ่งจะป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

2.5.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A จะเกิดทันทีทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3A

$$3CaO{\cdot}Al_2O_3+6H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6H_2O \qquad (2.9)$$

หรือ $C_3A+6H_2O \rightarrow C_3AH_6$

ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ จะมีการใส่ยิปซั่มเข้าไป เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป โดยยิปซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการต่อไปนี้

$$3CaO{\cdot}Al_2O_3+CaSO_4{\cdot}2H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}3lH_2O \quad (2.10)$$

หรือ C_3A+Gypsum$\rightarrow$ Ettringite

ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3S และ C_3A เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่ เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

2.5.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น C_4AF นี้ จะเกิดช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C_4AF

$4CaO{\bullet}Al_2O_3{\bullet}Fe_2O_3+CaSo_4{\bullet}2H_2O+Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO(Al_2O_3{\bullet}Fe_2O_3)3CaSO_4$ (2.11)

หรือ C_4AF+Gypsum+$Ca(OH)_2 \rightarrow$ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite

2.5.4 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยรวมของสารประกอบทั้ง 4 นั้น จะเกิด CSH Gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์ และเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งอธิบายการเกิด "Dormant Period" อันเป็นช่วงเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่ยังคงสภาพเหลวและสามารถไหลได้ในช่วง 1-2 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดช่วง Dormant Period จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Innitlal Set) โดย CSH ที่เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์อนุภาคปูนซีเมนต์จะเกิดการแตกออกด้วยแรงอัด Osmotic ซึ่งแรงดันนี้เกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของอิออนในสารละลายที่อยู่ระหว่าง Gel กับอนุภาคปูนซีเมนต์และอิออนในสารละลายที่อยู่รอบๆ GSH ทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่อไป

ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของปูนซีเมนต์ก่อนทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ทีละน้อย จนเกิดผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากขึ้น ทำให้เกิดจุดเชื่อมมากขึ้น จนถึงอนุภาคปูนซีเมนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และกลายเป็นจุดแข็งในที่สุด ซึ่งเข้าจุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)

2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ก็จะส่งผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วด้วยเช่นกัน ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2.5.5.1 อายุของซีเมนต์เพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมากที่สุดในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่งปฏิกิริยาจะสิ้นสุดโดยสมบูรณ์

2.5.5.2 องค์ประกอบของซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงแรกเท่านั้นขึ้นอยู่กับสารประกอบหลักแต่ละสาร โดยปูนซีเมนต์ที่มี C_3S และ C_3A มากจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงปลายของแต่ละสารประกอบหลักจะไม่แตกต่างกันนัก

2.5.5.3 ความละเอียดของปูนซีเมนต์ เมื่อมีความละเอียดของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงแรกสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความละเอียดจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นช่วงปลาย

2.5.5.4 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่ในช่วงหลัง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลงอัตราการเกิดปฏิริยาไฮเดรชั่นจะลดลง ส่งผลให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิริยาไฮเดรชั่น โดยเฉลี่ยดีกว่าการเกิดปฏิริยาไฮเดรชั่นลดลงด้วย

2.5.5.5 อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิริยาไฮเดรชั่นในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เพสต์

2.5.5.6 การผสมเพิ่ม มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทหน่วงปฏิริยาไฮเดรชั่น เช่น สารจำพวกน้ำตาล กรดและเกลือของ Lignosulphonic และประเภทเร่งปฏิริยาไฮเดรชั่น เช่น $C_{\alpha}Cl_2$

2.6 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$ ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำได้ หรือทำปฏิกิริยากับปูนขาวที่ประกอบด้วย ($Ca(OH)_2$ ทำให้เกิดเป็น CSH หรือ CAH ก่อให้เกิดการแข็งตัวและมีสมบัติในการยึดประสานได้ปฏิกิริยาที่เกิดดังสมการต่อไปนี้ [10]

$$(Ca(OH)_2 + SiO_2 + (n\text{-}l)H_2O \longrightarrow xCaO{\cdot}SiO_2{\cdot}nH_2O \qquad (2.12)$$

$$(Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + (n\text{-}l)H_2O \longrightarrow xCaO{\cdot}\ Al_2O_3{\cdot}nH_2O$$

$$(Ca(OH)_2 + SiO_2 + Al_2O_3 + (n\text{-}l)H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot} + Al_2O_3{\cdot}2SiO_2{\cdot}nH_2O$$

2.7 มวลรวม

มวลรวมคือ วัสดุเฉื่อย ที่ใช้เป็นวัสดุแทรกในคอนกรีต เช่น หิน,กรวด และทราย เป็นต้น มวลรวมเป็นวัสดุผสมคอนกรีตที่มีปริมาตรประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของคอนกรีต มีราคาถูกเมื่อเทียบกับวัสดุผสมอื่นๆ จึงทำให้คอนกรีตมีต้นทุนราคาต่ำลงและมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพสดและแข็งตัวแล้ว โดยพื้นฐานจะเป็นตัวกำหนด หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulas of Elasticity) และความคงตัวของปริมาตร (Volume Stability) ของคอนกรีต

ทรายเป็นมวลรวมวัตถุของเศษหิน เศษแร่ขนาดเล็ก มีลักษณะร่วนซุยไม่เกาะกัน เกิดจากกระบวนการผุพังสลายตัวทางธรรมชาติทั้งจากปฏิกิริยาทางเคมีและทางกายภาพของหินที่เป็นต้นกำเนิด เช่น หินอัคนี หินชั้นหรือหินตะกอน และหินแปร จากส่วนประกอบของหินต้นกำเนิดเหล่านี้ แร่เขี้ยวอนุมาน หรือ ควอร์ตซ์ (Quartz) เป็นแร่ที่มีความแข็งคงทนต่อการกัดกร่อนและคงสภาพอยู่ในสภาพเม็ดที่ใหญ่จึงคงค้างและเป็นส่วนประกอบสำคัญของทรายโดยทั่วไป เม็ดทรายมีขนาดระหว่าง 1/16 ถึง 2 มิลลิเมตร [7] จึงมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น ใช้เป็นมวลรวมหรือวัสดุผสมปูนซีเมนต์

แหล่งทรายในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นทรายที่ได้จากแม่น้ำและที่ราบลำน้ำเก่า หรือที่เรียกกันว่า "ทรายน้ำจืด" มากกว่าทรายที่ได้จากชายฝั่งและในทะเลซึ่งเป็นทรายที่เรียกกันว่า "ทรายทะเล" ทรายน้ำเกิดจากการพัดของกระแสน้ำจากแหล่งกำเนิดสะสมอยู่ตามร่องน้ำของขอบริมฝั่ง และตามที่ราบลุ่มทั่วไป ทรายที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตเป็นทรายชนิดน้ำจืด สามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้ 2 ชนิด ได้แก่ ทรายแม่น้ำ และทรายบก

ทรายแม่น้ำเป็นทรายที่เกิดจากการกัดเซาะของกระแสน้ำและค่อยๆตกตะกอนสะสมกลายเป็นแหล่งทรายอยู่ใต้ท้องน้ำ โดยทรายที่มีขนาดใหญ่น้ำหนักมากจะตกตะกอนอยู่บริเวณต้นน้ำ ส่วนทรายละเอียดนั้นจะถูกกระแสน้ำพัดพามารวมกันบริเวณท้ายน้ำ

ทรายบกเป็นทรายที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมกันของลำน้ำเก่าที่แปรสภาพเป็นพื้นดิน โดยมีซากพืชและซากสัตว์ทับถมกันบริเวณผิวหน้าเรียกกันว่าหน้าดิน มีความหนาประมาณ 2-10 เมตร

2.7.1 โครงสร้างของเฟสมวลรวม

การแบ่งองค์ประกอบตามโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของคอนกรีตซึ่งถือเป็นวัสดุคอมโพสิท (Composites) หรือวัสดุที่ประกอบมาจากหลายวัสดุหรือหลายเฟส (Phases) ที่มนุษย์สร้างขึ้น เฟสมวลรวมถือเป็นโครงสร้างวัสดุแทรกหนึ่งในสามเฟสสำคัญของโครงสร้างคอนกรีตแข็งตัวแล้ว อันได้แก่ เฟสเมตริกซ์ (Matrix Phase) หรือซีเมนต์เพส (Hydrated Cement Paste) เฟสวัสดุแทรก (Filler Phase) หรือมวลรวม (Aggregates) และเฟสรอยต่อถ่ายแรงระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม (Interface หรือ Transition Zone)

โดยทั่วไปเฟสมวลรวมเป็นเฟสที่มีกำลังสูงสุด จึงไม่มีผลกระทบต่อการรับกำลังของคอนกรีตแข็งตัว ยกเว้นในกรณีต่อไปนี้

กรณีหินผุหรือหินพรุน มีผลทำให้คอนกรีตกำลังต่ำกว่าปกติ

กรณีมวลรวมเบา (Light Aggregate) ซึ่งใช้เป็นมวลรวมในการผสมทำคอนกรีตมวลเบา (Light Weight Concrete) มีผลทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่มีน้ำหนักปกติ (Nomal-Weight Concrete)

กรณีกำลังสูงมาก (Very hight Strength Concrete) กำลังของเฟสมวลรวมจะมีผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีต

2.7.2 การจำแนกประเภทของมวลรวม

มีหลายวิธีในการจำแนกประเภทของมวลรวมดังนี้

มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) หินหรือกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร (ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลผสมคอนกรีต หรือ มอก.566 ยอมให้มวลรวมหยาบมีส่วนที่ละเอียดกว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง

มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตรหรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200) โดยมาตรฐาน มอก. 566 ยอมให้มวลรวมละเอียดกว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง

2.8 ทฤษฎีการนำความร้อน

การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ การนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งจะกล่าวถึงเฉพาะการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เนื่องจากเป็นการนำความร้อนที่เกี่ยวข้องโดยอุณหภูมิจะถ่ายเทจากด้านในสู่ด้านนอกของวัตถุซึ่งเป็นการถ่ายเทพลังงานจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ขอบเขตที่มีอุณหภูมิต่ำ ค่าการนำความร้อนสามารถวัดได้ด้วยการวัดปริมาณที่เรียกว่าค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity,k) ที่มีหน่วยเป็น W/m°K ในระบบ SI และ Btu/ft ในระบบอังกฤษ ซึ่งสารที่มีการนำความร้อนสูงเรียกว่า ตัวนำความร้อน (Conductor) ส่วนสารที่มีค่าการนำความร้อนต่ำจะเรียกว่าฉนวน (Insulation) โดยโจเซฟ ฟูเรียร์ (Joseph Fourier) [9] นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสผู้ศึกษาการนำความร้อนอย่างละเอียดจากการเก็บข้อมูลของการนำความร้อนจากการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการนำนั้นจะแปรผันโดยตรงกับค่าการนำความร้อน พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการไหล และอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง ในการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการนำความร้อนที่มีระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (สม่ำเสมอ) กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ ใน 1 มิติ คือ

$$Q = -kA\, dT/dx \qquad (2.14)$$

โดยที่ Q = อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในทิศทาง X

K = ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน

dT/dx = การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง X

2.8.1 สมการระบบพิกัดตั้งฉาก

โดยพิจารณาปริมาตรขนาดเล็กในระบบพิกัด (x,y,z) แต่ละพิกัดมีความยาว ซึ่งสามารถเขียนสมดุลพลังงานบนปริมาตรควบคุม ที่มีมิติ dx, dy, dz จะได้ว่า

(อัตราการไหลเข้าของความร้อน) - (อัตราการไหลออกของความร้อน) – (อัตราการผลิตความร้อน) = (อัตราการสะสมความร้อน)

$$(dQ_x + dQ_y + dQ_z) - (dQ_{x+dx} + dQ_{y+dy} + dQ_{2+dz}) + Q_{gcn} = Q_{acc} \quad (2.15)$$

โดยที่ $dQ_{x+dx} = dQ + \frac{\partial(dQ_x)}{\partial x}dx$ ส่วนเทอม dQ_{y+dy} และ dQ_{z+dz} ก็ได้ในทำนองเดียวกัน

Q_{gcn}=g dx dy dz เมื่อ g คืออัตราการผลิตความร้อนต่อหน่วยปริมาตร (W/m^3)

$$Q_{acc}=m\frac{\partial u}{\partial t}=pcdxdydz\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.16)$$

เมื่อแทนเทอมต่างๆดังกล่าวข้างต้นลงในสมการ จะได้

$$Gdxdydz=\frac{\partial(dQ_x)}{\partial_x}dx + \frac{\partial(dQ_y)}{\partial_y}dy + \frac{\partial(dQ_z)}{\partial_z} + pcdxdydz\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.17)$$

แทนสมการการนำความร้อนของฟูเรียร์ลงในสมการ จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(kdA_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)dx + \frac{\partial}{\partial y}\left(kdA_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)dy + \frac{\partial}{\partial z}\left(kdA\frac{\partial T}{\partial z}\right)dz + gdxdydz = pcdxdydz\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.18)$$

หารตลอดด้วย dx dy dz สมการ จะลดรูปเป็น

$$\frac{\partial}{dx}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{dy}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + g = pc\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.19)$$

ถ้าค่าสภาพนำความร้อน (k) มีค่าคงที่จะได้

$$k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + g = pc\frac{\partial T}{\partial t}$$

หรือ $$k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{g}{k} = \frac{l}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.20)$$

เมื่อ T = T(x,y,z,t) และ α คือค่า Thermal Diffusivity ซึ่งเท่ากับ $\frac{k}{pc}$

2.9 อลูมิเนียม

อลูมิเนียม เป็นโลหะที่สำคัญ ได้รับการใช้งานมากที่สุด ในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (light Mctals)

2.9.1 การผลิตอลูมิเนียมจากสินแร่ (Primary Aluminium)

อลูมิเนียมเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่พบบนผิวโลก โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งจะปะปนอยู่กับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และเหล็ก แร่อลูมิเนียมที่สามารถนำมาถลุงเพื่อผลิตโลหะอลูมิเนียมได้นั้นจะเป็นแร่ซึ่งประกอบด้วยปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์ที่ต่ำ ซึ่งได้แก่ จำพวกแร่บอกไซด์ (Bauxite) และแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) โดยแร่ที่นิยมนำมาถลุงเพื่อผลิตอลูมิเนียม ได้แก่ แร่บอกไซด์ โดยมีส่วนประกอบของอลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมิน่า (Al_2O_3) ร้อยละ 35-65 ซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 0.5-10 ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) เหล็กออกไซด์ (Fc_2O_3) ร้อยละ 2-30 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ0-55[12] แต่ในการสำรวจแหล่งแร่ในประเทศไทยไม่พบแร่บอกไซด์แต่พบในประเทศใกล้เคียง เช่น มาเลเซีย และเวียดนาม ซึ่งในขั้นตอนการถลุงแร่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ คือ การแยกอลูมินาออกจากแร่บอกไซด์ และการแยกโลหะอลูมิเนียมออกจากอลูมิน่า โดยกระบวนการแยกอลูมิเนียมออกจากอลูมินาที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ กระบวนการของ Hall และ Heroult [10] ซึ่งการผลิตอลูมิเนียมจากสินแร่นั้นต้องใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยถึงประมาณ 15,141 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อการผลิตอลูมิเนียม 1 เมตริกตัน [14] ซึ่งปริมาณการใช้ไฟฟ้าค่อนข้างสูง ดังนั้น ประเทศที่ค่าไฟฟ้ามีราคาแพงอุตสาหกรรมการผลิตอลูมิเนียมจึงไม่สามารถดำเนินการผลิตได้ ดังเช่นประเทศไทย เป็นต้น เพราะว่าอลูมิเนียมที่ผลิตได้จะมีราคาสูงกว่าราคาอลูมิเนียมในตลาดโลก

2.9.1.2 อลูมิเนียมที่ได้จากการรีไซเคิล (Secondary Aluminum)

โลหะอลูมิเนียมสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตอลูมิเนียมจากสินแร่ถึงร้อยละ 95 [15] ซึ่งพบว่าในกระบวนการรีไซเคิลนั้นใช้พลังงานน้อยกว่าอย่างมาก จึงส่งผลให้มีการนำโลหะอลูมิเนียมมารีไซเคิลเกิดขึ้นกว้างขวาง

2.10 การรั่วไหล

การรั่วไหลคือ ระดับของสิ่งที่เกิดขึ้นและสิ่งที่เราสนใจเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งอยู่ในระดับที่มีอันตราย หรือมีส่วนประกอบอื่นที่เป็นสิ่งที่ไม่เป็นที่ต้องการ เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากการกำจัดของเสีย และแพร่ผ่านเข้าสู่สิ่งแวดล้อมโดยผ่านทางน้ำที่ไหลซึมผ่านขยะหรือออกมาจากกองฝังกลบการรั่วไหลสามารถวัดได้โดยวิธี Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) เป็นการทดสอบศักยภาพการรั่วไหลของของเสีย ที่เกิดขึ้นจากการจัดการที่ผิดพลาดและคาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคต [16] น้ำสกัด (Leachate) คือน้ำที่ชะมลพิษต่างๆออกมาจากของเสีย เช่น น้ำผิวดิน หรือน้ำใต้ดิน ประกอบด้วยสสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และของแข็งอื่น ๆ ปนอยู่ในรูปของสารละลายและตะกอนแขวนลอย ซึ่งขึ้นกับลักษณะและองค์ประกอบของกากของเสีย รวมทั้งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ความสามารถในการรั่วซึมของสารมลพิษ (Leach ability: L) หาได้จากอัตราส่วนของปริมาณสารมลพิษที่ออกมาจากตัวอย่าง และปริมาณสารมลพิษที่มีอยู่เดิมในตัวอย่าง

$$L = C_1/C_0$$

โดย L = ความสามารถในการชะละลาย (มิลิกรัม/ลิตร)

C_1 = ความเข้มข้นของสารพิษก่อนทำการสกัด (มิลิกรัม/ลิตร)

C_0 = ความเข้มข้นของสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด (มิลิกรัม/ลิตร)

หรือเทียบปริมาณสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด (W_1) หารด้วยปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด $L = W_1/W_0$

โดย W_0 = ปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด (มิลลิกรัม)

W_1 = ปริมาณสารพาที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด (มิลลิกรัม)

2.10.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการรั่วไหล [17]

1. pH control โดยทั่วไปโลหะไฮดรอกไซด์มีค่าความสามารถในการละลายต่ำ ในช่วงความเป็นกรดด่างประมาณ 7.5-11 แต่มีโลหะบางชนิดที่มีสมบัติเป็นสารแอมโพเทอร์ริก (amphoteric) สารมารถละลายได้ทั้งในช่วงค่าความเป็นกรดด่างทั้งสูงและต่ำ ดังนั้นการหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมีความเป็นกรดด่างประมาณ 12-13 จึงสามารถลดความสามารถในการละลายของโลหะได้

2. Redox Potential โลหะหลายชนิดเมื่ออยู่ในรูปสารละลายสามารถเปลี่ยนสถานะวาเลนซ์อิเลกตรอนได้ ซึ่งทำให้สมบัติทางเคมีของโลหะเหล่านั้นเปลี่ยนแปลงไป เช่นความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobilization) โลหะดังกล่าวได้แก่ As Cr Fe Mg และ Mn

3. ปฏิกิริยาเคมี เช่นการตกตะกอนในรูป ตะกอนไฮดรอกไซด์ ตะกอนวัลไฟด์ และตะกอนคาร์บอเนต ภายใต้สภาวะความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม

4. การดูดซับ เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัส มักจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับ ขนาดของอนุภาค รูปร่าง และความพรุน

5. การดูดซับทางเคมีการดูดซับชนิดนี้จะมีปฏิกิริยาเคมีเข้าไปเกี่ยวข้อง แรงยึดเหนี่ยวจะมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ

6. Passivationเกิดเมื่อไอออนของโลหะทำปฏิกิริยากับแอนไอออน แล้วเกิดเป็นตะกอนอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสเมื่อปริมาณตะกอนเพิ่มมากขึ้นจะทำหน้าที่เสมือนเป็นเยื่อกั้น (impermeability layer) ไม่ทำให้น้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งการกระทำนี้จะเกิดขึ้นชั่วคราว

7. การแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนที่อยู่ในสารละลายมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุนั้น (Cation exchange capacity: CEC) ขึ้นกับประจุของ hydrate cationและขนาดไอออนในสารละลาย

8. Diadochy คือการแทนที่ธาตุที่มีลักษณะ และประจุที่คล้ายกันใน crystal lactice

9. Reprecipitation เป็นปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญของการหล่อแข็งกากของเสียที่มีโลหะปนเปื้อน ในกรณีที่หล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุปอซโซลานนั้น ขั้นตอนแรกจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพสต์จะมีความเป็นด่างสูงเนื่องจากการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ไอออนของโลหะจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ขณะเดียวกันซิลิกาเริ่มละลายแล้วเปลี่ยนรูปเป็นซลิเคต หลังจากนั้นโลหะไฮดรอกไซด์กับซิลิเคตจะรวมตัวกันเป็นตะกอน (precipitation) ภายในเพสต์ ก่อให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

10. การตรึง (Encapsulation) เป็นการเก็บกักของเสียไว้ภายในก้อนหล่อแข็ง

11. การเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของของเสีย ของเสียที่จะนำมาหล่อแข็งนั้นบางชนิดไม่สามารถที่จะนำมาหล่อแข็งได้เลย ต้องนำไปเปลี่ยนสมบัติบางประการก่อนเช่น การลดออกซิเดชั่นของโครเมียม +6 ไปเป็นโครเมียม +3 ซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ต่ำกว่า การทำลายโครงสร้างของไซยาไนด์ เพื่อลดความเป็นพิษ การดึงน้ำ (dewatering) ออกจากของเสียเพื่อลดปริมาตร หรือลดขนาดของเสีย

2.11 งานวิจัยที่ผ่านมา

วิริยะ ธารพันธุ์ และคณะ [2] ได้นำโคลนปูนจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมาใช้แทนทรายในการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยทำการเตรียมคอนกรีตมวลเบาที่ มี ฝุ่นอลูมิเนียมจากโรงหล่อหลอมอลูมิเนียม ร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 และปูนขาวในอัตราส่วนเท่ากับ 100:0 80:20 70:30 และ 60:40 และใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุยึดประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 และปูนขาว) และทรายเท่ากับ 1:1 โดยใช้โคลนปูนแทนทราย

ละเอียด ร้อยละ 0 50 และ 100 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบพบว่าโคลนปูนสามารถนำมาใช้แทนทรายได้ในอัตราส่วน ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 และปูนขาวเท่ากับ 80:20 ปริมาณฝุ่นอลูมิเนียม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.7 ให้กำลังรับแรงอัดที่ 90 วันเท่ากับ 47 กก./ซม.^{2} และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 938 กก./ลบ.ม. ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอก. 1505-2541 : ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ – อบไอน้ำชั้นคุณภาพ 4 (กำลังอัดมากกว่า หรือเท่ากับ 40กก./ซม.^{2} ความหนาแน่นตั้งแต่ 701 ถึง 800 กก./ลบ.ม.) ยกเว้น ความหนาแน่นเกินมาตรฐาน นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตได้ พบว่ามีค่าการนำความร้อนต่ำเท่ากับ 0.31 วัตต์/เมตร.เคลวิน สามารถนำไปใช้เป็นผนังเพื่อลดการนำความร้อนเข้าสู่อาคารได้

ปณชัย โตวิชา และคณะ [4] โดยนำเถ้าแกลบสังเคราะห์มาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 ในอัตราร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก วัสดุยึดประสาน(ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบสังเคราะห์ และปูนขาว)และปูนขาวร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน มอร์ต้าร์มวลเบาเตรียมโดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุยึดประสานต่อทรายเท่ากับ 2:1 และทำการเติมสารกักกระจายฟองอากาศ 3 ชนิดได้แก่ Aluminium Powder Portland Foam และ Portland Light ในอัตราร้อยละ 0.5 และ 1 ของวัสดุยึดประสาน ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่ใช้ Aluminium Powder ร้อยละ 1 และมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ร้อยละ 60 ให้ค่าความหนาแน่นทั้งก้อนต่ำสุดเท่ากับ 0.89 กก.ลบ.ม. ส่วนกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเท่ากับ 41 กก./ซม^2 และค่าการนำความร้อน 0.701 W/m$^\circ$K

Kiattikomol K. [18] ได้ศึกษาการทำคอนกรีตพรุนโดยการเติมฟองอากาศที่เกิดจากสารเคมีลงไปในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศนี้ได้จากการอัดอากาศลงไปในสารละลาย Sodium Laurly Ether Sulphate ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตพรุนขึ้นกับความหนาแน่น และปริมาณฟองอากาศที่เติมลงไป โดยใช้อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.6 อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายละเอียดเท่ากับ 1:1 และปริมาณฟองอากาศ 0.15ม.^{3}/100 กก.ซีเมนต์ มีกำลังรับแรงอัด 35 กก./ซม.^{2} ความหนาแน่นเท่ากับ1,000กก./ม.^{3}

เจริญฤทธิ์ กรรณะพาหุ และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาคอนกรีตพรุนโดยการเติมฟองอากาศที่เกิดจากแสงเคมีลงในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศนี้ได้จากการอัดอากาศลงไปในสารละลาย Sodium Laury Ether Sulphate ($NaC_{12}H_{25}SO_4$) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตร โดยใช้ฟองอากาศที่แตกต่างกัน (100 125 150 175 200 ลิตรต่อซีเมนต์ 100 กิโลกรัม) โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 ผสมกับทรายละเอียดในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 0.50 0.55 และ 0.6 โดยน้ำหนัก จากการวิจัยพบว่า คอนกรีตพรุนที่ใช้อัตราส่วน W/C เท่ากับ 0.6 ร่วมกับปริมาณ

ฟองอากาศ 100 ลิตรต่อซีเมนต์ 100 กิโลกรัม และบ่มด้วยไอน้ำความดันสูงเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทิ้งไว้ในอากาศ 14 วัน จะมีสมบัติทางกลดีที่สุด คือมีกำลังแรงอัด 81.84 กก./ซม.^{2} ความหนาแน่นเท่ากับ 1.254 ก./ซม.^{3} กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนที่เปรียบเทียบระหว่างการบ่มด้วยไอน้ำความดันสูงและที่ไม่ได้บ่มพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนที่ทำการบ่มด้วยไอน้ำความดันสูงจะมีค่าสูงกว่าประมาณร้อยละ 21 ถึง 25 และปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่น โดยจะทำให้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นลดลง แต่จะมีผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพรุน

Tommy Y Lo และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา ทำการศึกษาโดยใช้มวลรวม 3 ขนาดคือ 5 15 และ 25 มม. ปริมาณน้ำ 0.4 0.44 และ 0.48 มล. ผลการทดลองพบว่าค่ากำลังมีค่าต่ำในระยะสั้นและมีค่าสูงในระยะยาวโดยมีค่ากำลังอัดสูงสุด 46.4 MPa ที่ 56 วันจากตัวอย่างที่ทำการผสมมวลรวมขนาด 15 มิลลิเมตรที่ปริมาณน้ำ 0.4 ml และการเพิ่มปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง

Sukontasakul [21] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตมวลเบา ทำการศึกษาโดยใช้โฟม (Roeocell) และอลูมิเนียมเป็นสารในการผสมคอนกรีตมวลเบาในอัตราส่วน Roeocell 0.1 และร้อยละ 0.2 และผงอลูมิเนียมร้อยละ 0.5 และ 1.0 ในการผสมตัวอย่างที่มีการแทรกเถ้าลอยผลการศึกษาพบว่าค่าความหนาแน่นต่ำสุด 1.435 จากการผสม Roeocell ร้อยละ 0.2 และกำลังอัดมีค่าสูงสุดในระยะยาวโดยค่ากำลังอัดสูงสุด 10.36 MPa จากผงอลูมิเนียมร้อยละ 1.0 เถ้าลอยร้อยละ 30 ที่อายุ 28 วัน

Romazon Dmirboga [22] ได้ทำการศึกษาค่าการนำความร้อนและกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ (7.5 และ 15) และตระกรันเตาเผาแร่ในปริมาณร้อยละ (15 และ 30) ในอัตราส่วน 1:1 (ของวัสดุแต่ละชนิด) ในการผสมตัวอย่างที่ทำการศึกษาจากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการแทนที่ของวัสดุในปริมาณสูงขึ้นค่าการนำความร้อนมีค่าลดลงค่าการนำความร้อนต่ำสุด 0.951 W/m°K จากตัวอย่างที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 และ ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นในระยะยาวค่ากำลังอัดสูงสุด 59.1 MPa จากตัวอย่างที่มีตระกรันเตาเผาแร่ร้อยละ 15 ที่อายุ 120 วันโซนิคดังสมการ $f'c=0.21657\ e^{0.00217v}$

จักรกริช กิตติปาลกุล และคณะ [23] ทำการศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตพรุนโดยใช้ปูนซีเมนต์ แลนด์ประเภทที่ 1 และทำการบ่มคอนกรีตพรุนด้วยไอน้ำความดันสูง โดยใช้ผงอลูมิเนียมเป็นตัวทำให้เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณร้อยละ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.55 0.60 และ 0.65 ปริมาณปูนขาวร้อยละ 3 5 และ 7 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซั่มใช้คงที่เท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

จากนั้นหล่อตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ทำการถอดแบบหลังจาก 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบด้วยหม้ออบไอน้ำความดันสูงเป็นเวลา 16 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดคอนกรีตพรุนแปรผันตรงกับความหนาแน่น แต่จะแปรผกผันกับปริมาณอลูมิเนียมและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ ที่อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.55 ปริมาณผงอลูมิเนียมร้อยละ 2 ปริมาณปูนขาวร้อยละ 5 โดยมีค่าความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ 0.76 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 40.01 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ธนพล พูลคล้าย และคณะ [24] ได้ทำการเพิ่มกำลังอัดในช่วงอายุต้นๆของคอนกรีตพรุนโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 โดยใช้ผงอลูมิเนียมเป็นตัวทำให้เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณร้อยละ 0.1 0.2 และ 0.3โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต่อทรายเท่ากับ 1:1 และ 1:2 โดยทรายที่ใช้มี 3 ประเภท ทรายบดละเอียด, ทรายบดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 230 และเศษวัสดุเหลือจากการตัดแต่งคอนกรีตพรุน (Return Slurry) ปริมาณปูนขาวเท่ากับร้อยละ 3 5 และ 7 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์อัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.50 จากการวิจัยพบว่าที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย Return Slurry 1:2 ปริมาณผงอลูมิเนียมร้อยละ 0.3 ปริมาณปูนขาวร้อยละ 7 ให้คอนกรีตพรุนที่มีค่าความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ 0.714 และ กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 40.06 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ชลดล พึ่งธรรมจิตต์ [25] ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำโดยที่เถ้าลอยที่ใช้ในการวิจัยได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง และคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ ทำการศึกษาถึงผลกระทบคือ อุณหภูมิระหว่างผสมความหนาแน่นแห้งกำลังอัด การดูดกลืนน้ำ และการเปลี่ยนแปลงความยาวในสภาวะควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในทดสอบอัตราการดูดกลืนน้ำ ความหนาแน่นแห้ง กำลังอัดมีขนาด 50x50x50 มม. ขณะที่ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวมีขนาด 40x40x160 มม. ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้คือปริมาณเถ้าลอยที่แทนที่ ในซีเมนต์ตั้งแต่ ร้อยละ 0 (ควบคุม)ถึง ร้อยละ100 โดยเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ10 และ ความหนาแน่นของคอนกรีตมี 3 ระดับ คือ D0.45 D0.55 และD0.65 จากผลการศึกษาพบว่าการแทนที่เถ้าลอยไม่แสดงให้เห็นเด่นชัดถึงผลกระทบต่อความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาขณะที่การแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบทำให้อุณหภูมิระหว่างผสมกำลังอัด และการดูดกลืนน้ำ ของคอนกรีตมวลเบามีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่า การหดตัวของคอนกรีตมวลเบามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยมากขึ้น

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

ในบทนี้จะแสดงรายละเอียดและวิธีการดำเนินงานวิจัย ขั้นตอนในการค้นคว้ารวบรวมข้อมูล โดยหัวข้อที่ 3.1จะกล่าวถึงวัตถุขาวในการทดลองหัวข้อที่ 3.2 จะกล่าวถึงอัตราส่วนผสมและปริมาณน้ำ หัวข้อที่ 3.3 จะกล่าวถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหัวข้อที่ 3.4 จะกล่าวถึงลักษณะของตัวอย่างที่นำมาทดสอบหัวข้อที่ 3.5 จะกล่าวถึงการเตรียมตัวอย่างและหัวข้อที่3.6 จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบ ดังต่อไปนี้

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุยึดประสาน

3.1.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ตรา ช้างสีแดงของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทยจำกัด (มหาชน) กลุ่มเครือซีเมนต์ไทย ผลิตที่จังหวัดสระบุรี

3.1.1.2 ปูนขาว (Quick lime)

ปูนขาวเป็นปูนขาวสุกชนิดตกแต่งที่คัดเกรดจาก บริษัท สยามผลิตภัณฑ์ปูนขาว จำกัด ผลิตที่จังหวัดสระบุรี

3.1.1.3 เถ้าแกลบขาว

เถ้าแกลบขาวที่ใช้ในการศึกษาเป็นเถ้าแกลบที่ผ่านกระบวนการเผาอิฐมอญมาตรฐาน มอก.ประเภท ก. จากโรงผลิตอิฐมอญ ตำบลงิ้วราย อำเภออินทร์บุรี จังหวัดสิงห์บุรี โดยเถ้าแกลบขาวที่ได้จะถูกนำมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาบดด้วยเครื่อง Los Angelesดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้ลูกเหล็กจำนวน 22 ลูกความเร็วรอบ 30 - 33 รอบ/นาทีเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงนำเถ้าแกลบที่ได้มาทำการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน 325 โดยให้เถ้าแกลบค้างบนตะแกรงมาตรฐานประมาณร้อยละ 34

3.1.1.4 เถ้าลอย

เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาเป็นมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3.1.2 มวลรวมละเอียด

ทรายที่ใช้เป็นทรายละเอียด เป็นทรายธรรมชาติจากแม่น้ำเจ้าพระยาภายในจังหวัดสิงห์บุรี โดยทรายที่ได้มาจะถูกนำมาล้างให้สะอาดเพื่อขจัดสารอินทรีย์ ดิน และสารเจือปนอื่นๆ ออก นำมาผึ่งให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 เพื่อนำเอาส่วนที่เป็นหินออกทำการบดทรายด้วยเครื่อง Los Angeles ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใส่ทรายละเอียดในปริมาณรอบละ 7 กิโลกรัม โดยใช้ลูกเหล็กจำนวน 22 ลูกความเร็วรอบ 30 - 33 รอบ/นาทีเป็นเวลา 10 ชั่วโมงแล้วจึงนำทรายร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ผ่านตะแกรงเบอร์100

3.1.3 กากตะกรันอลูมิเนียม

กากตะกรันอลูมิเนียมได้มาจากโรงหลอมอลูมิเนียมภายในตำบลบ้านข่อย อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ซึ่งมีการนำผลิตภัณฑ์ที่ใช้อลูมิเนียมเป็นส่วนผสม เช่น กระป๋อง น้ำอัดลม ชิ้นส่วนอะไหล่รถมาหลอมละลายใหม่ เพื่อผลิตชิ้นส่วน วัสดุ อุปกรณ์และผลิตภัณฑ์ใหม่ กากตะกรันอลูมิเนียมที่ได้จะถูกนำมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 10 เพื่อนำเศษอลูมิเนียมและสิ่งเจือปนออกทำการบดกากของเสียอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Los Angeles โดยใส่กากของเสียอลูมิเนียมในปริมาณรอบละ 7 กิโลกรัม โดยใช้ลูกเหล็กจำนวน 22 ลูกความเร็วรอบ 30 - 33 รอบ/นาทีเป็นเวลา 10 ชั่วโมงแล้วจึงนำกากของเสียอลูมิเนียมนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 และตะแกรงเบอร์ 200 ในการวิจัยนี้จะแบ่งการใช้กากตะกรันอลูมิเนียมออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) กากตะกรันหยาบหมายถึงกากตะกรันที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 แต่ค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

2) กากตะกรันละเอียดหมายถึงกากตะกรันที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

เมื่อนำกากตะกรันอลูมิเนียมมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF พบว่า มีปริมาณของอลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) ผสมอยู่ในกากตะกรันร้อยละ 73.5 โดยน้ำหนัก ที่เหลือเป็นเหล็กสังกะสี และโลหะหนักอื่นที่ถูกนำมาหลอมรวมกัน

รูปที่ 3.1 Los Angeles Abrasion Machine

3.1.4 น้ำสะอาด

น้ำที่ใช้สำหรับการผสมมอร์ต้าร์เป็นน้ำประปา

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมกากของเสียอลูมิเนียมที่ผ่านการบดและไม่บดที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาวและเถ้าลอยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา เครื่องมือที่ใช้ได้ประยุกต์ตามมาตรฐานการทดสอบ ดังนี้

1) เครื่องกวนผสมตัวอย่างเพสต์
2) แบบหล่อทองเหลือง (Mold) รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C 109-11 [27]
3) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
4) ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20, 50,100, 200 และเบอร์ 325
5) เครื่องบดละเอียด Los Angeles Abrasion Machine
6) อุปกรณ์ ได้แก่ เกรียง, ช้อนตัก, แปรงทาน้ำมัน, แปรงทองเหลืองทำความสะอาด
7) เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์
8) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต Universal Testing Machine
9) กระบะบ่มคอนกรีต

10) อุปกรณ์ Flow Table Test ตามมาตรฐานASTM: C 230-08 [26]
11) เส้นลวดปาดหน้าปูน
12) ตู้อบวัสดุ
13) กระบอกตวงน้ำ
14) เครื่องทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่าน
15) เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อน(Hot Disk Thermal Constant Analyser)
16) แบบหล่อตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 3 ซม.
17) เครื่องทดสอบการรั่วไหลของอลูมิเนียมด้วยวิธี (TCLP)

(ก) แบบหล่อกำลังรับแรงอัด

(ข) ตู้อบวัสดุ

(ข) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

(ง) เครื่องกวนผสมตัวอย่าง

รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.3 อัตราส่วนผสมและปริมาณน้ำที่ใช้

อัตราส่วนผสมรวมทั้งปริมาณน้ำที่ใช้สำหรับตัวอย่างแต่ละชุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และมีรายละเอียดดังอธิบายในหัวข้อต่อไปนี้

3.3.1 อัตราส่วนผสมของวัสดุประสาน

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาโดยใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุประสาน 3 ส่วนผสมดังนี้

1) กลุ่มตัวอย่างควบคุม (Control) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนขาวเท่ากับ 80 : 20

2) กลุ่มตัวอย่าง CRHA ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20

3) กลุ่มตัวอย่าง CPFA ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20

3.3.2 อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุประสาน : ทราย

อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายในการวิจัยครั้งนี้ จะใช้อัตราส่วนผสมคงที่เหมือนกัน คือ 1 : 0.5

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวอย่างและอัตราส่วนผสมที่ใช้

ตัวอย่าง	วัสดุยึดประสาน				วัสดุยึดประสานต่อทราย	กากตะกรันอลูมิเนียม ร้อยละ 30โดยน้ำหนัก	W/B
	ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)	เถ้าแกลบขาว (ร้อยละ)	เถ้าลอย (ร้อยละ)	ปูนขาว (ร้อยละ)			
Control	80	-	-	20	1:0.5	-	0.67
Control-N	80	-	-	20		บดไม่ละเอียด	0.86
Control-S	80	-	-	20		บดละเอียด	0.88
CRHA	30	50	-	20	1:0.5	-	0.93
CRHA-N	30	50	-	20		บดไม่ละเอียด	1.16
CRHA-S	30	50	-	20		บดละเอียด	1.45
CPFA	30	-	50	20	1:0.5	-	0.54
CPFA-N	30	-	50	20		บดไม่ละเอียด	0.80
CPFA-S	30	-	50	20		บดละเอียด	0.85

3.3.3 ปริมาณกากตะกรันอลูมิเนียม

กากตะกรันอลูมิเนียมถูกใช้ในปริมาณคงที่เหมือนกัน คือ ร้อยละ 30 ของน้ำหนักวัสดุยึดประสานโดยมีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมมีอยู่ 3 ลักษณะคือ

1) ไม่เติมกากตะกรันอลูมิเนียมได้แก่กลุ่มตัวอย่าง Control, CRHA, CPFA
2) เติมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบได้แก่กลุ่มตัวอย่าง Control-N, CRHA-N,CPFA-N
3) เติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่บดละเอียดได้แก่ กลุ่ม Control-S,CRHA-S,CPFA-S

3.3.4 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน

ปริมาณน้ำที่ใช้ได้มาจากการทดสอบโดยประยุกต์ด้วยวิธีการ Flow Table Test ตามมาตรฐานASTM : C 230-08 [26] ซึ่งมีผลดังแสดงในตารางที่ 3.1 และมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

1) นำปูนซีเมนต์ นำทราย ปูนขาวและเถ้าแกลบขาว เถ้าลอย มาชั่งตามปริมาณที่กำหนดไว้
2) นำส่วนผสมทั้งหมดมาคลุกให้เข้ากัน
3) ใส่น้ำ จากนั้นทิ้งไว้ 30 วินาที
4) คลุกด้วยความเร็วระดับ 1 เป็นเวลา 30 วินาที
5) คลุกด้วยความเร็วระดับ 2 เป็นเวลา 1 นาที
6) นำส่วนผสมที่คลุกเรียบร้อยแล้ว ทดสอบด้วยอุปกรณ์ Flow Table Test
7) ใส่คอนกรีตครั้งหนึ่งและทำการตำด้วยเหล็กกลม 25 ครั้ง จากนั้นปาดส่วนเกินและทำความสะอาดโดยรอบ
8) ถอดบล็อกเหล็กออก แล้วทำการเคาะ 15 ครั้งภายใน 15 วินาที
9) ทำการวัดขนาดฐานล่างของคอนกรีตให้มีความกว้างให้มีค่าระหว่าง 20.5 - 22.5 เซนติเมตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 105 -115 แสดงดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 การหาปริมาณน้ำด้วยวิธี Flow Table Test

3.4 ลักษณะของตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะมีอยู่ 2 ลักษณะได้แก่

1) ตัวอย่างที่มีรูปร่างเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตรตามมาตรฐาน ASTM C 109-11 [27] จะนำมาใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่นการ ดูดกลืนน้ำ และการรั่วไหลของอลูมิน่า

2) ตัวอย่างทีมีรูปร่างทรงสี่เหลียมจัตุรัส ขนาด 20 x 20 x 3 เซนติเมตรจะนำมาใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติการนำความร้อน

3.5 การเตรียมตัวอย่าง

การผสมมอร์ต้าร์จะผสมด้วยเครื่องผสมที่ได้ประยุกต์ตามมาตรฐาน ASTM C 305-11 [28] โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ทำความสะอาดใบพายและหม้อผสมของเครื่องมือผสมให้แห้งแล้วใส่น้ำที่เตรียมไว้จากการตวงด้วยกระบอกตวงตามปริมาณที่กำหนด

2) ทำการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมลงในน้ำที่ทำการเตรียมตามอัตราส่วนที่กำหนด และทำการผสมโดยใช้ความเร็วเป็นระดับ 2 และปั่นเป็นเวลา 1 นาที

3) คลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันทั่วถึงตามอัตราส่วนที่กำหนดแล้วเทส่วนผสมทั้งหมดที่มีน้ำและกากตะกรันอลูมิเนียมผสมอยู่ใส่เครื่องผสมมอร์ต้าร์เริ่มปั่นด้วยความเร็วระดับ1เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบแล้วทำการปาดส่วนผสมที่กระจายออกให้เข้ากัน

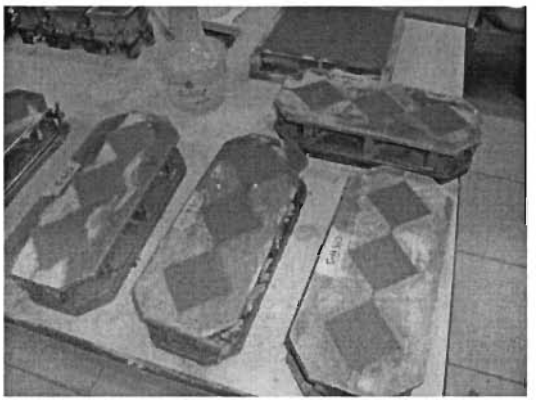
4) เปลี่ยนระดับความเร็วเป็นระดับ 2 และปั่นเป็นเวลา 1 นาที ดังรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 เครื่องผสมมอร์ต้าร์

เมื่อผสมเสร็จแล้วนำมอร์ต้าร์มาเทใส่แบบหล่อ 2 ขนาดได้แก่ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C 109-11 [27] และเทใส่แบบหล่อขนาด 20x20x3 เซนติเมตรที่เตรียมไว้โดย มอร์ต้าร์ที่ผสมกากตะกรันอลูมิเนียมให้เทส่วนผสม 2 ใน 3 ของความสูงของแบบหล่อ ทั้งนี้เพื่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาดังแสดงรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 การเทเนื้อมอต้าร์ประมาณ 2ใน 3 ของความสูงของแบบหล่อ

5) ทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นปาดตกแต่งส่วนที่ล้นออกด้วยเส้นลวดตัดให้เรียบร้อยโดยไม่ต้องกดเนื้อมอร์ต้าร์ให้แน่น ดังแสดงรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เทมอร์ต้าร์ลงในแบบหล่อ และปาดหน้าให้เรียบ

6) ทำการถอดแบบหล่อเมื่อครบ 24 ชั่วโมง เขียนหมายเลขรหัสที่ชิ้นตัวอย่างให้เรียบร้อย นำไปบ่มน้ำเป็นเวลา 3 7 14 และ28 วัน ดังแสดงรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 บ่มน้ำเป็นระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน

8) เมื่อครบกำหนดแล้ว ก่อนการทดสอบ 1 วัน นำชิ้นตัวอย่างออกวางไว้ในสภาพอากาศปกติ

9) นำไปทดสอบในขั้นต่อไปดังแสดงรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างที่พร้อมนำไปทดสอบ

3.6 การทดสอบ

3.6.1 การทดสอบหากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 14และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 -11 [27] โดยทดสอบกับคอนกรีตมวลเบารูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยมีการควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ 1.4 – 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีจนตัวอย่างเกิดการวิบัติจึงนำค่าน้ำหนักกดสูงสุด (Pmax) มาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัด (σ) โดยการหารด้วยพื้นที่ (A) ดังสมการที่ 3.1

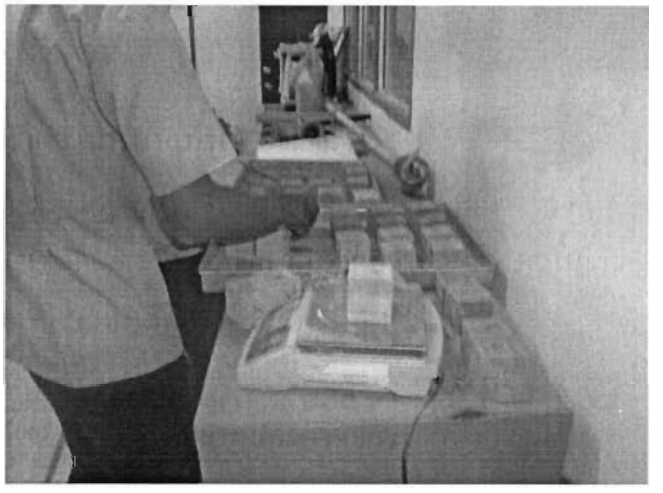
$$\text{กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต} \quad \sigma = \frac{Pmax}{A} \tag{3.1}$$

รูปที่ 3.9 การนำทดสอบการรับแรงอัด

3.6.2 การทดสอบหาความหนาแน่น (Density)

การทดสอบหาความหนาแน่นทำที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C134 [29] โดยนำตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร ไปชั่งน้ำหนัก วัดความกว้าง ความยาว ความสูง ดังแสดงรูปที่ 3.10 แล้วคำนวณหาค่าความหนาแน่น ดังสมการที่ 3.1

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง (ลบ.ซม.)}} \qquad (3.2)$$



รูปที่ 3.10 การชั่งน้ำหนักและวัดขนาดมิติของตัวอย่าง

3.6.3 การหาค่าการดูดกลืนน้ำ (Absorption)

การหาค่าการดูดกลืนน้ำโดยการนำชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตรที่อายุ 28 วัน ขึ้นจากบ่อบ่ม จากนั้นนำไปอบด้วยอุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงรูปที่ 3.11 เมื่อครบ 24 ชั่วโมงจึงนำตัวอย่างออกจากเตาอบและชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเป็น Wd (น้ำหนักตัวอย่างแห้งในอากาศ) แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วใช้ผ้าเช็ดเพื่อไม่ให้มีความชื้นที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง และนำมาชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเป็น Wt (น้ำหนักตัวอย่างที่อิ่มตัวผิวแห้ง) จากนั้นนำค่าน้ำหนักมาคำนวณหาค่าการดูดกลืนน้ำ ดังสมการที่ 3.3

$$\text{ค่าการดูดกลืนน้ำ} = \frac{Wt - Wd \quad (kg)}{\text{Volume} \quad (m^3)} \qquad (3.3)$$

รูปที่ 3.11 การนำตัวอย่างทดสอบเข้าตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ ± 115° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.6.4 การทดสอบการรั่วไหลของอลูมิน่า

การหาการรั่วไหลของอลูมิน่าใช้วิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) โดยนำตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัด มาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรง ให้ได้ขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ 9.5 มิลลิเมตร และใช้น้ำฝนสังเคราะห์เป็นตัวชะละลายโลหะนาน 18 ชั่วโมง แล้วนำผลไปเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน US EPA (1992) [30]

3.6.5 การหาค่าการนำความร้อน

การหาค่าการนำความร้อน ใช้วิธีทดสอบตาม Thermal Constant Analysis (TCA) มาตรฐานของ ASTM C 177-10 [31] โดยใช้ตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ขนาด 20 x 20 x 3 เซนติเมตรซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ Hot Disk Thermal Constant Analyser (Hot Disk AB)

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะแสดงผลการทดสอบประกอบไปด้วยสมบัติของคอนกรีตมวลเบาโดยหัวข้อที่ 4.1กล่าวถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกรันอลูมิเนียม หัวข้อที่ 4.2 กล่าวถึงผลการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา หัวข้อที่ 4.3 กล่าวถึงผลของกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตมวลเบา หัวข้อที่ 4.4 กล่าวถึงผลความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา หัวข้อที่4.5 กล่าวถึงผลการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบา หัวข้อที่ 4.6 กล่าวถึงผลของการรั่วไหลของอลูมิน่า หัวข้อที่ 4.7 กล่าวถึงผลของการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา หัวข้อที่ 4.8 กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัด การดูดกลืนน้ำ การรั่วไหลของอลูมิน่า และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกรันอลูมิเนียม

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ กากตะกรันอลูมิเนียมโดยวิธี X-Ray Fluorescence ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence ของกากตะกรันอลูมิเนียม

องค์ประกอบทางเคมี	กากตะกรันอลูมิเนียมร้อยละ
SiO_2	4.29
Al_2O_3	73.5
Fe_2O_3	10.31
MgO	4.90
PbO	5.32
LOI	1.68

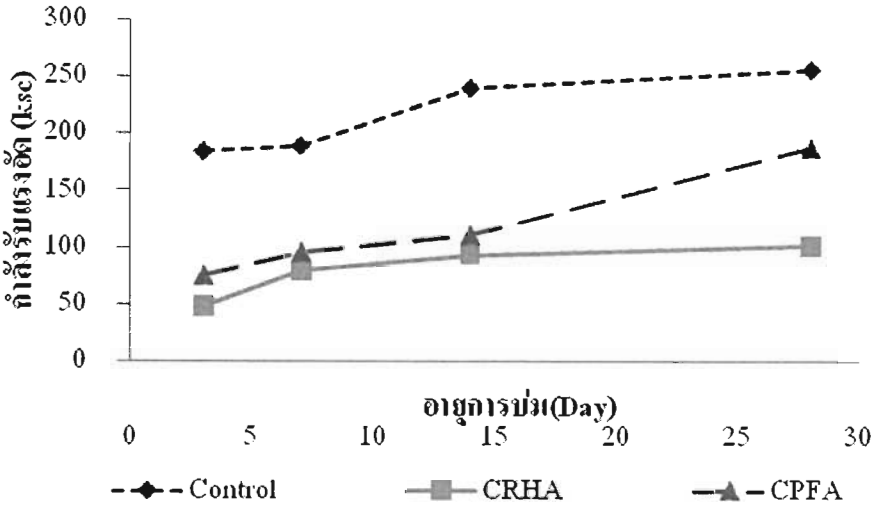
จากตารางที่ 4.1 พบว่ากากตะกรันอลูมิเนียมมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักโดยมีอยู่ในปริมาณร้อยละ 73.5 รองลงมา ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และตะกั่วออกไซด์ (PbO) โดยมีอยู่ในปริมาณร้อยละ10.31 และ 5.32 ตามลำดับ

4.2 ผลการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

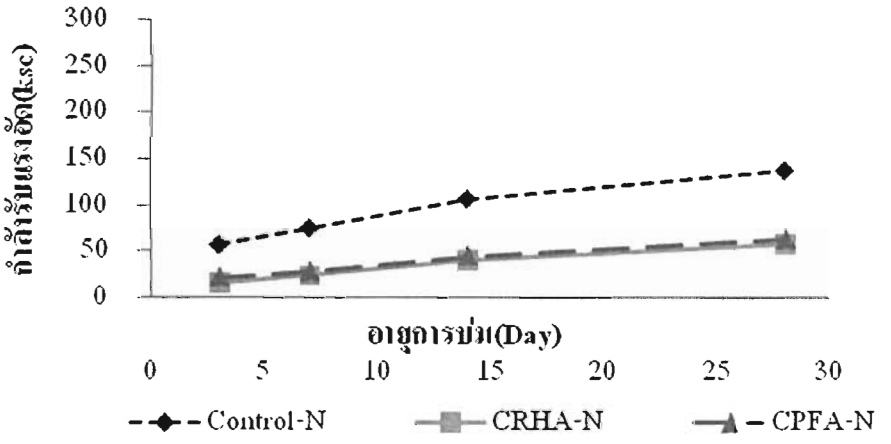
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทั้งหมด ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา

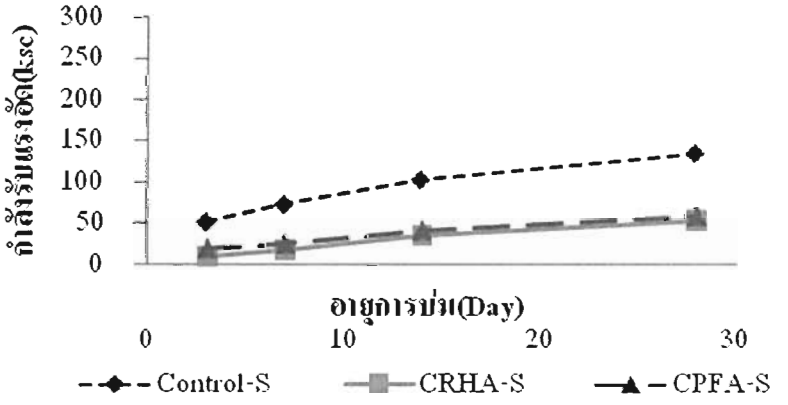
ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (Ksc)				
ตัวอย่าง	อายุการบ่ม (Day)			
	3	7	14	28
Control	184	189	240	256
Control–N	57	75	107	138
Control–S	52	73	103	135
CRHA	48	79	93	101
CRHA–N	15	23	39	57
CRHA–S	10	18	36	53
CPFA	76	96	111	187
CPFA–N	21	27	44	62
CPFA-S	19	25	41	58



(ก) ไม่เติมกากตะกรันอลูมิเนียม



(ข) เติมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบร้อยละ 30



(ค) เติมกากตะกรันอลูมิเนียมละเอียดร้อยละ 30

รูปที่ 4.1 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ (Control) และที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย (CPFA) และด้วยเถ้าแกลบขาว (CRHA)

จากตารางที่ 4.2และรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาของตัวอย่างทุกชุด มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาชุดควบคุม (Control) ที่อายุ 3 7 14 และ 28 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 184 189 240 และ 256 กก/ซม^{2}ตามลำดับ เมื่ออายุคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ได้แก่C_3S C_2S C_3A C_4AF จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับน้ำและจะพัฒนามากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาว (CRHA)และเถ้าลอย (CPFA) พบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากเถ้าทั้งสองชนิดเป็นวัสดุปอซโซลานเมื่อมีการแทนที่ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 ทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์ที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 60 โดยตัวอย่างที่ผสมเถ้าแกลบขาวจะส่งผลให้ตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด

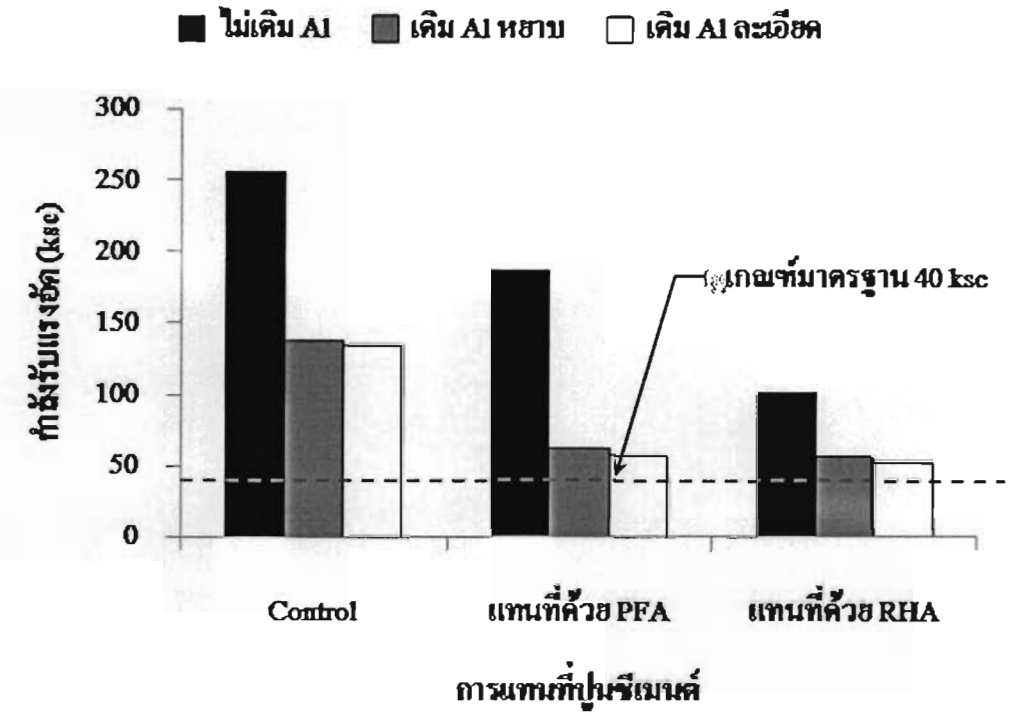
เมื่อมีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมลงไปในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน พบว่าตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาจะมีลักษณะการพัฒนากำลังรับแรงอัดในแบบเดียวกันแต่จะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเติมกากตะกรัน

4.3 กำลังรับแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตมวลเบา

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทั้งหมดที่อายุ 28 วัน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ (OPC)	การเติมตะกรันอลูมิเนียม (Al)	ชื่อชุดตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (Ksc)
ไม่มี	ไม่เติม	Control	256
	เติม Al หยาบร้อยละ 30	Control-N	138
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	Control-S	135
แทนที่ด้วยเถ้าลอย (PFA)	ไม่เติม	CPFA	187
	เติม Al หยาบร้อยละ 30	CPFA-N	62
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	CPFA-S	58
แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ (RHA)	ไม่เติม	CRHA	101
	เติม Al หยาบร้อยละ 30	CRHA-N	57
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	CRHA-S	53



รูปที่ 4.2 ผลกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทุกชุดที่อายุ 28 วัน

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (PFA) และ เถ้าแกลบขาว (RHA) มีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดของชุดควบคุม (Control) โดยตัวอย่างที่มีเถ้าแกลบขาว (RHA) มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาชุดตัวอย่างที่มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียม (เติม Al หยาบ และ เติม Al ละเอียด) พบว่า การเติมกากตะกรันอลูมิเนียม มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง มีค่าลดลง เนื่องจากกากตะกรันอลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วจะเกิดฟองอากาศ (H_2) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างลดลงกำลังรับแรงอัดจึงมีค่าลดลงด้วยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของปณชัย โตวิชาและคณะ [4] โดยในชุดควบคุม (Control-N และ Control-S) ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 50 ส่วนในชุดที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (CPFA-N และ CPFA-S) ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงร้อยละ 60 ถึงร้อยละ 70 และในชุดที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาว (CRHA-N และ CRHA-S) ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 50

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่มีการผสมระหว่างกากตะกรันอลูมิเนียมที่หยาบและกากตะกรันอลูมิเนียมบดละเอียด พบว่าการบดกากตะกรันอลูมิเนียม ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงประมาณร้อยละ 2-7 แสดงให้เห็นว่าการบดกากตะกรันอลูมิเนียมไม่มีผลต่อการรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัด

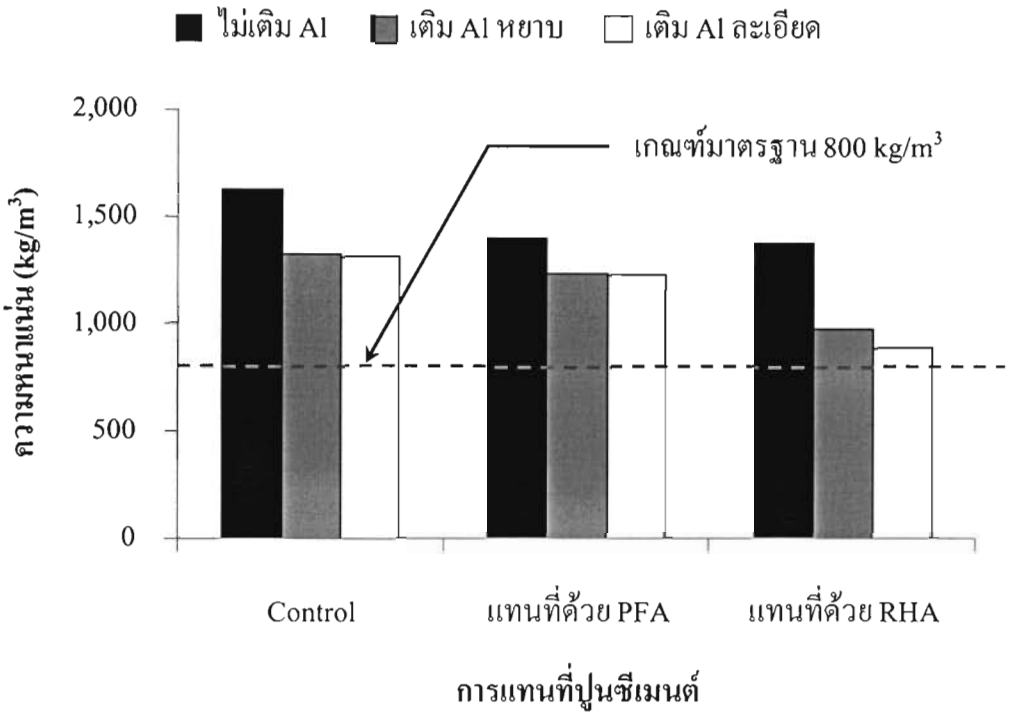
ของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทุกชุดกับค่ากำลังรับแรงอัดวัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1505-2541 สำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ – อบไอน้ำ ชั้นคุณภาพ 4 [32] พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบของทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่า 40 กก/ซม^2 ที่ระบุไว้ในมาตรฐาน

4.4 ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา

ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทั้งหมดที่อายุ 28 วัน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ (OPC)	การเติมตะกรันอลูมิเนียม (Al)	ชื่อชุดตัวอย่าง	ความหนาแน่น (kg/m^3)
ไม่มี	ไม่เติม	Control	1,633
	เติม Al หยาบร้อยละ 30	Control-N	1,327
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	Control-S	1,316
แทนที่ด้วยเถ้าลอย (PFA)	ไม่เติม	CPFA	1,405
	เติม Al หยาบร้อยละ 30	CPFA-N	1,235
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	CPFA-S	1,227
แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ (RHA)	ไม่เติม	CRHA	1,383
	เติม Al หยาบร้อยละ 30	CRHA-N	983
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	CRHA-S	887



รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (PFA) และเถ้าแกลบขาว (RHA) ทำให้ตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นลดลงจาก 1,633 กก/ม^3 ของชุดควบคุม (Control) เป็น 1,405 กก/ม^3 (PFA) และ 1,383 กก/ม^3 (RHA) ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าลอย (ถ.พ. เท่ากับ 2.75) และเถ้าแกลบขาว (ถ.พ. เท่ากับ 2.16) ที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ และเมื่อพิจารณาผลของการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมในปริมาณร้อยละ30โดยน้ำหนัก พบว่า การเติมกากตะกรันอลูมิเนียมมีผลทำให้ ความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา มีค่าลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 12 ถึง ร้อยละ 36 เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่มีการผสมกากตะกรันอลูมิเนียมที่หยาบและบดละเอียด พบว่าการบดส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทุกชุด มีค่าเกิน 800 กก/ม^3 ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐาน มอก.1505-2541 ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ – อบไอน้ำ ชั้นคุณภาพ 4 [32]

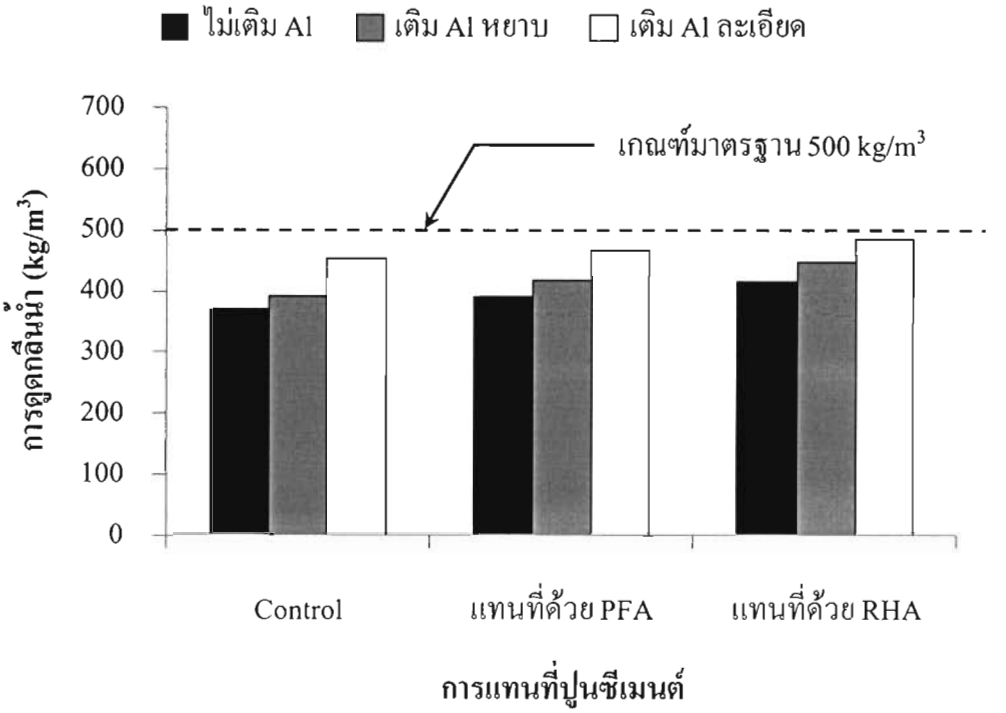
ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการลดค่าความหนาแน่นของตัวอย่างลง สามารถทำได้โดย 1) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบขาว 2) การเติมกากตะกรันอลูมิเนียม ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และ 3) การใช้กากตะกรันที่บดละเอียด

4.5 การดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบา

ผลการทดสอบค่าการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วันได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ (OPC)	การเติมตะกรันอลูมิเนียม (Al)	ชื่อชุดตัวอย่าง	การดูดกลืนน้ำ (kg/m^3)
ไม่มี	ไม่เติม	Control	371
	เติม Al หยาบร้อยละ 30	Control-N	392
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	Control-S	416
แทนที่ด้วยเถ้าลอย (PFA)	ไม่เติม	CPFA	390
	เติม Al หยาบร้อยละ 30	CPFA-N	418
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	CPFA-S	446
แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ (RHA)	ไม่เติม	CRHA	454
	เติม Al หยาบร้อยละ 30	CRHA-N	467
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	CRHA-S	485



รูปที่ 4.4 การดูดกลืนน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน

เมื่อพิจารณาชุดตัวอย่างที่ไม่มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมจากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 พบว่า ค่าการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอย (PFA) และ เถ้าแกลบขาว (RHA) โดยมีค่าการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้น จาก 371 กก/ม^3 ของชุดควบคุม (Control) เป็น 390 กก/ม^3 (PFA) และ 454 กก/ม^3 (RHA) ตามลำดับ โดยตัวอย่างที่มีเถ้าแกลบขาวมีค่าการดูดกลืนน้ำสูงที่สุด เนื่องจากเถ้าแกลบขาวมีความสามารถในการดูดกลืนน้ำมากกว่าเถ้าลอย

เมื่อมีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมแบบหยาบและละเอียดร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่ามีผลทำให้ตัวอย่างมีค่าการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมละเอียดจะมีค่าการดูดกลืนน้ำมากกว่าตัวอย่างที่มีการผสมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบ เนื่องจากการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่ละเอียดจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ดีกว่าการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่หยาบส่งผลทำให้คอนกรีตมวลเบามีรูพรุนในเนื้อมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมวลเบาดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดูดกลืนน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทุกชุด มีค่าไม่เกิน 500 กก/ม^3 ซึ่งเป็นค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก.1505-2541 ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ – อบไอน้ำ ชั้นคุณภาพ 4 [32]

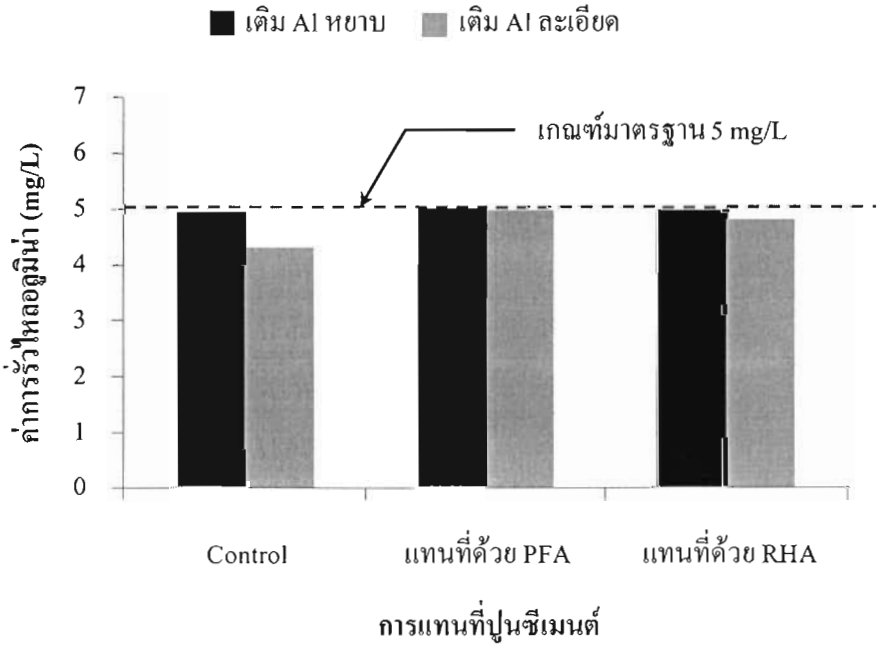
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบขาว การเติมกากตะกรันอลูมิเนียมและการใช้กากตะกรันที่บดละเอียดมีผลทำให้ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบามีค่าการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้น

4.6 การรั่วไหลของอลูมิน่า

ผลการทดสอบหาค่าความเข้มข้นของอลูมิน่าที่รั่วไหลของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่หยาบและที่ละเอียด ที่อายุ 28 วันด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นของอลูมิน่าที่รั่วไหลด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

การแทนที่ปูนซีเมนต์ (OPC)	การเติมตะกรันอลูมิเนียม (Al)	ชื่อชุดตัวอย่าง	ความเข้มข้นของอลูมิน่า (mg/L)
ไม่มี	เติม Al หยาบร้อยละ 30	Control-N	4.95
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	Control-S	4.31
แทนที่ด้วยเถ้าลอย (PFA)	เติม Al หยาบร้อยละ 30	CPFA-N	4.98
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	CPFA-S	4.96
แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ (RHA)	เติม Al หยาบร้อยละ 30	CRHA-N	4.97
	เติม Al ละเอียดร้อยละ 30	CRHA-S	4.81



รูปที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นของอลูมิน่า ของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน

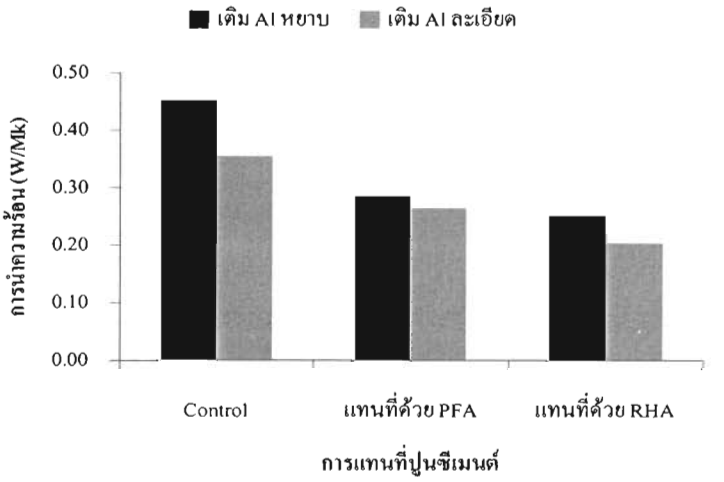
จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบขาวส่งผลทำให้มีการรั่วไหลของอลูมิน่าเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมมีการรั่วไหลอลูมิน่ามากกว่า เมื่อพิจารณาผลของความละเอียดของกากตะกรันอลูมิเนียมจากการบดพบว่า ตัวอย่างที่มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมละเอียดจะมีการรั่วไหลของอลูมิน่า ต่ำกว่าตัวอย่างที่เติมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการรั่วไหลของอลูมิน่าของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทุกชุด มีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/ลิตรเป็นเกณฑ์มาตรฐาน US EPA (1992) [30] ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใส่กากตะกรันอลูมิเนียมที่หยาบและที่ละเอียดสามารถนำไปใช้งานได้จริง และไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้

4.7 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

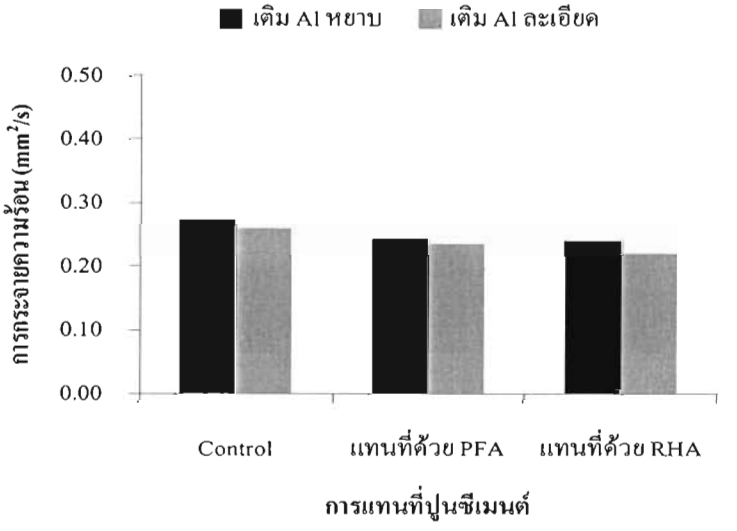
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาด้วยเครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyser โดยใช้เทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

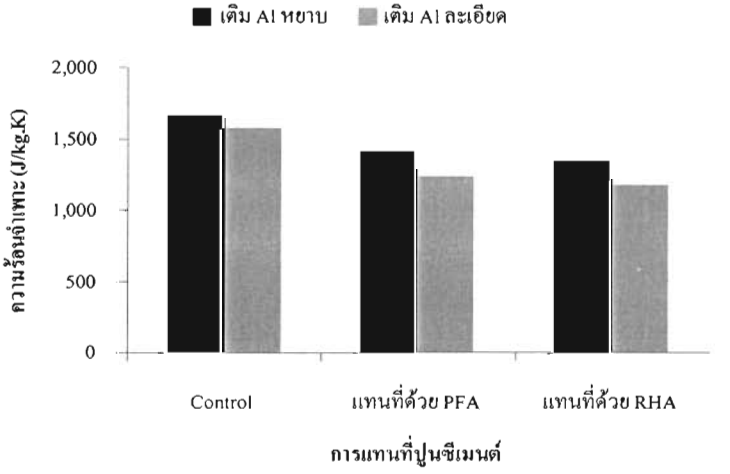
ค่าสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบา				
ชื่อตัวอย่าง	**ความหนาแน่น (kg/m^3)**	**การนำความร้อน (W/Mk)**	**การกระจายความร้อน (mm^2/s)**	**ความร้อนจำเพาะ (J/kg.K)**
Control-N	1,327	0.4523	0.2729	1,672
Control-S	1,316	0.3522	0.2589	1,573
CPFA-N	1,235	0.2876	0.2443	1,422
CPFA-S	1,227	0.2622	0.2345	1,234
CRHA-N	983	0.2529	0.2389	1,356
CRHA-S	887	0.2022	0.2189	1,173



(ก) การนำความร้อน



(ข) การกระจายความร้อน



(ค) ความร้อนจำเพาะ

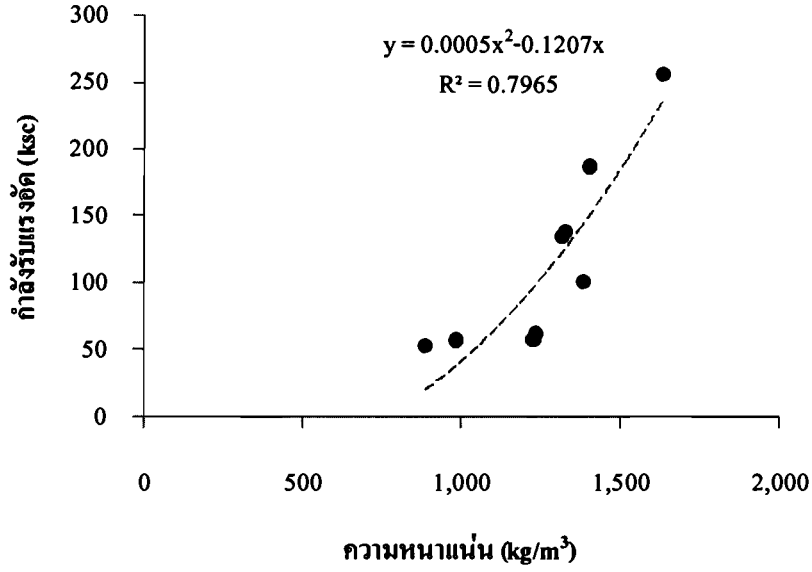
รูปที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา

จากตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบขาวมีผลทำให้การนำความร้อน การกระจายความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะต่ำของตัวอย่างมีค่าลดลง โดยตัวอย่างที่มีเถ้าแกลบขาวจะมีค่าทางความร้อนต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาผลของความละเอียดของกากตะกรันอลูมิเนียมจากการบด พบว่า ตัวอย่างที่มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่ละเอียดจะมีค่าการนำความร้อน การกระจายความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะต่ำกว่าตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่เติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่หยาบ

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัด การดูดกลืนน้ำ การรั่วไหลของอลูมิน่า และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน

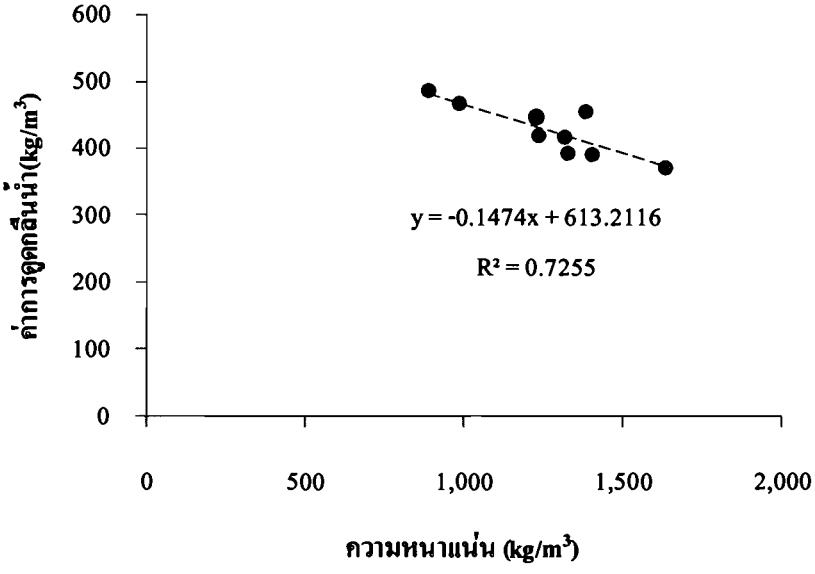
ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่ากำลังรับแรงอัด การดูดกลืนน้ำ การรั่วไหลของอลูมิน่า และการนำความร้อน ของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน

ชื่อตัวอย่าง	ความหนาแน่น (kg/m^3)	กำลังรับแรงอัด (Ksc)	การดูดกลืนน้ำ (kg/m^3)	การรั่วไหลของอลูมิน่า (mg/L)	การนำความร้อน (W/Mk)
Control	1,633	256	371	-	-
Control-N	1,327	138	392	4.95	0.4523
Control-S	1,316	135	416	4.31	0.3522
CPFA	1,405	187	390	-	-
CPFA-N	1,235	62	418	4.98	0.2876
CPFA-S	1,227	58	446	4.96	0.2622
CRHA	1,383	101	454	-	-
CRHA-N	983	57	467	4.97	0.2529
CRHA-S	887	53	485	4.81	0.2022



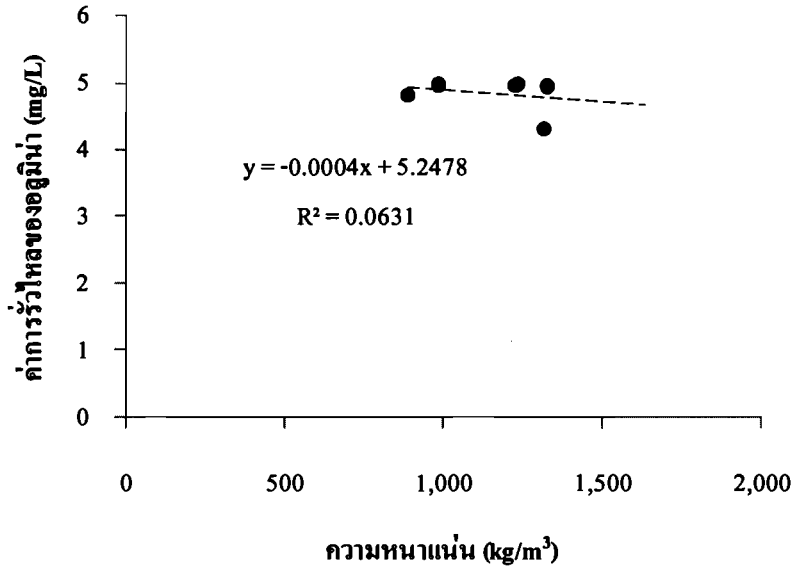
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบามีความสัมพันธ์แบบพาราโบลา อยู่ในระดับค่อนข้างสูง (R^2 = 0.797) โดยกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบามีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น



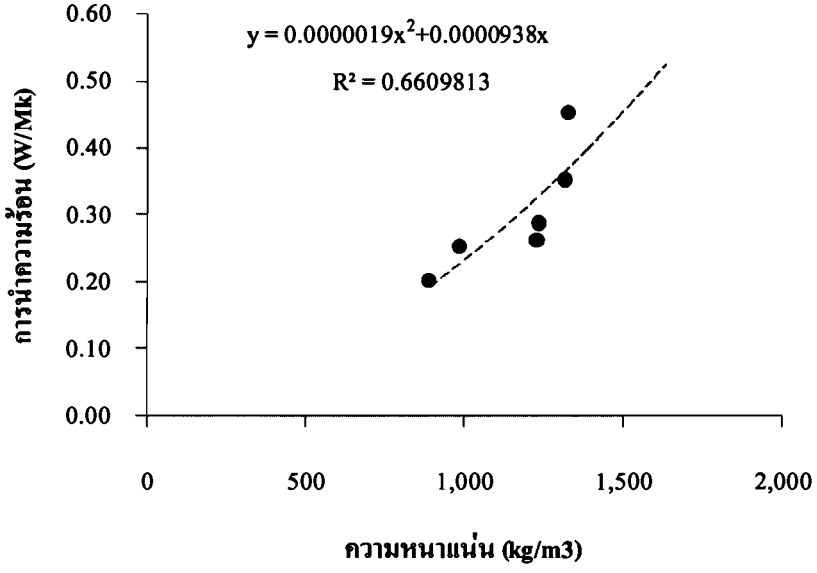
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นกับการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นอยู่ในระดับปานกลาง (R^2 = 0.7255)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับการรั่วไหลของอลูมิน่าของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาไม่มีความสัมพันธ์กับการรั่วไหลของอลูมิน่า ($R^2 = 0.0631$)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ค่าความหนาแน่นกับการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา มีความสัมพันธ์แบบพาราโบลาอยู่ในระดับปานกลาง ($R^2 = 0.660913$) เมื่อความหนาแน่นลดลงค่าการนำความร้อน Thermal Conductivity และค่าความร้อนจำเพาะ Specific Heat จะลดลงด้วย

เนื่องจากโครงสร้างของเนื้อวัสดุคอนกรีตมวลเบาจะมีลักษณะเป็นรูพรุนเป็นฟองอากาศกระจายอยู่ภายในทำให้กักเก็บความร้อนได้มากและสามารถส่งผ่านความร้อนไปได้ช้าทำให้กระจายความร้อนได้ดีเมื่อความหนาแน่นน้อยแสดงว่ามีฟองอากาศอยู่ภายในมากทำให้ความร้อนเดินทางไปได้ช้าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Del Coz Diaz และคณะ [25] ที่ว่าลักษณะช่องว่างภายในคอนกรีตมีผลต่อค่าการนำความร้อน Sukontasukkul เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่มีขายทั่วไป (Q-CON) [33] มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.13 วัตต์/เมตร.เคลวินพบว่าตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาทุกชุดมีค่าการนำความร้อนมากกว่าทั้งนี้เพราะคอนกรีตมวลเบาที่มีขายทั่วไปใช้วิธีอบไอน้ำความดันสูงโดยอบที่อุณหภูมิ 180 องศาความดัน 12 บาร์เป็นเวลา 8-16 ชั่วโมงทำให้มีฟองอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุซึ่งช่องอากาศเหล่านี้จะทำหน้าที่ลดทอนหรือยืดหน่วงพลังงานความร้อนเอาไว้ไม่ให้ผ่านจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงตัวกลางตลอดเวลาระหว่างเนื้อวัสดุและช่องอากาศทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าที่ไม่ได้อบไอน้ำความดันสูงแต่ก็เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้พลังงานอย่างมาก

จากผลการทดสอบดังกล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตมวลเบาเพื่อใช้ในการก่อสร้างที่มีราคาถูกและมีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากเมื่อเปรียบกับการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำความดันสูง ซึ่งจะมีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากมากกว่าและใช้พลังงานมากกว่าส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงกว่า การผลิตคอนกรีตอบไอน้ำความดันสูงเมื่อทำการถอดแบบหล่อจะนำมอร์ต้าร์ที่ได้ไปเข้าตู้อบอบไอน้ำซึ่งเป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาในงานวิจัยนี้จะใช้การบ่มด้วยน้ำจึงทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มนานกว่าโดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สามารถใช้เป็นผนังสำหรับบ้านพักอาศัยได้ อีกทั้งมีค่าการนำความร้อนต่ำ ซึ่งจะช่วยลดความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคาร เป็นการช่วยประหยัดพลังงานได้อีกทางหนึ่งด้วย อีกทั้งค่าการรั่วไหลของอลูมิน่ามีค่าต่ำซึ่งไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้ ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถนำไปต่อยอด หรือปรับปรุงสมบัติบางประการที่ยังด้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีขายตามท้องตลาดได้

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมกากของเสียอลูมิเนียมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาวและเถ้าลอยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบขาว

1) ด้านกำลังรับแรงอัด การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาว และเถ้าลอย ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบามีค่าลดลง เนื่องจากการแทนที่ด้วยปริมาณถึงร้อยละ 50 ทำให้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 50 โดยคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าแกลบขาวมีกำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด

2) ด้านความหนาแน่น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และ เถ้าแกลบขาว ทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง เนื่องจาก เถ้าลอย และเถ้าแกลบขาว ที่แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ โดยคอนกรีตมวลเบาที่มีเถ้าแกลบขาวมีความหนาแน่นน้อยที่สุดเนื่องจากเถ้าแกลบขาวมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเถ้าลอย

3) ด้านการดูดกลืนน้ำ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และ เถ้าแกลบขาว ทำให้ค่าการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเถ้าลอย และ เถ้าแกลบขาว ทำให้เนื้อคอนกรีตมีโพรงเพิ่มขึ้น จึงดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบขาวมากที่สุดเนื่องจากเถ้าแกลบขาวมีความสามารถในการดูดกลืนน้ำมากกว่าเถ้าลอย

4) ด้านค่าการรั่วไหลอลูมิน่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบขาวส่งผลทำให้มีการรั่วไหลของอลูมิน่าเพิ่มขึ้นโดยการรั่วไหลอลูมิน่ามีค่าสูงสุดเมื่อตัวอย่างที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม

5) ด้านการนำความร้อน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบขาวมีผลทำให้การนำความร้อนของตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากโครงสร้างของเนื้อวัสดุคอนกรีตมวลเบาจะมีลักษณะเป็นรูพรุนเป็นฟองอากาศกระจายอยู่ภายใน ทำให้กักเก็บความร้อนได้มาก และสามารถส่งผ่านความร้อนไปได้ช้า โดยคอนกรีตมวลเบาที่มีเถ้าแกลบขาวเป็นส่วนผสมจะมีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด

5.1.2 อิทธิพลของการเติมกากตะกรันอลูมิเนียม

1) ด้านกำลังรับแรงอัด การเติมกากตะกรันอลูมิเนียม ทำให้คอนกรีตมวลเบาที่เทในแบบหล่อจะมีการฟูขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง อยู่ในช่วงร้อยละ 40 ถึง ร้อยละ 70 เนื่องจากกาก

ตะกรันอลูมิเนียม ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้ เกิดฟองขนาดเล็ก คอนกรีตจึงเกิดการฟู ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างลดลง กำลังรับแรงอัดจึงมีค่าลดลงด้วย

2) ด้านความหนาแน่น การเติมกากตะกรันอลูมิเนียม มีผลทำให้ ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา มีค่าลดลง อยู่ในช่วงร้อยละ 12 ถึง ร้อยละ 36 โดยค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาวเติมกากตะกรันอลูมิเนียมละเอียดมีค่าต่ำสุด

3) ด้านการดูดกลืนน้ำ การเติมกากตะกรันอลูมิเนียม มีผลทำให้ค่าการดูดกลืนน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลทำให้คอนกรีตมวลเบามีรูพรุนในเนื้อมากขึ้นทำให้คอนกรีตมวลเบาดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 6 ถึง ร้อยละ 20

4) ด้านการนำความร้อน การเติมกากตะกรันอลูมิเนียม มีผลทำให้ ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบามีค่าน้อยลงค่าการนำความร้อน Thermal Conductivity และค่าความร้อนจำเพาะ Specific Heat จะลดลงด้วย มีค่าน้อยลงอยู่ในช่วงร้อยละ 8 ถึง ร้อยละ 20 เนื่องจากการเติมตะกรันอลูมิเนียมจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดฟองอากาศ (H_2) ส่งผลทำให้คอนกรีตมวลเบามีรูพรุนมากขึ้น ทำให้กักเก็บความร้อนได้มาก และสามารถส่งผ่านความร้อนไปได้ช้า

5.1.3 อิทธิพลของความละเอียดของกากตะกรันอลูมิเนียม

1) ด้านกำลังรับแรงอัด การผสมกากตะกรันอลูมิเนียมบดละเอียด มีผลทำให้คอนกรีตมวลเบามีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าการผสมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบประมาณร้อยละ 2-7 แสดงให้เห็นว่าการบดกากตะกรันอลูมิเนียมส่งผลต่อการรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาน้อยมาก

2) ด้านความหนาแน่น การผสมกากตะกรันอลูมิเนียมบดละเอียด มีผลทำให้ คอนกรีตมวลเบามีค่าความหนาแน่นลดลง จากการผสมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 0.5-9 โดยความละเอียดของกากตะกรันอลูมิเนียมส่งผลต่อความหนาแน่นน้อยมาก

3) ด้านการดูดกลืนน้ำ การผสมกากตะกรันอลูมิเนียมบดละเอียด มีผลทำให้คอนกรีตมวลเบามีค่าการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างที่เติมกากตะกรันอลูมิเนียมแบบหยาบประมาณร้อยละ 3-7 โดยความละเอียดของกากตะกรันอลูมิเนียมส่งผลต่อการดูดกลืนน้ำ น้อยมาก

4) ด้านค่าการรั่วไหลอลูมิน่า การเติมกากตะกรันอลูมิเนียมบดละเอียด มีผลทำให้การรั่วไหลของอลูมิน่า ต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่เติมกากตะกรันอลูมิเนียมแบบหยาบประมาณร้อยละ 0.4 – 13 โดยความละเอียดของกากตะกรันอลูมิเนียมส่งผลต่อการรั่วไหลน้อยมาก

5) ด้านการนำความร้อน การเติมกากตะกรันอลูมิเนียมบดละเอียดมีผลทำให้ค่าการนำความร้อน การกระจายความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะต่ำกว่าตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ที่เติมกากตะกรันอลูมิเนียมแบบหยาบประมาณร้อยละ 8 – 20 โดยความละเอียดของกากตะกรันอลูมิเนียมส่งผลต่อการนำความร้อน น้อยมาก

การบดกากตะกรันให้ละเอียดเพิ่มขึ้นส่งผลต่อ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น การดูดกลืนน้ำ การรั่วไหลของอลูมิน่า และคุณสมบัติด้านความร้อน น้อยมาก ดังนั้นในการบดกากตะกรันอลูมิเนียมให้ละเอียด ทำให้เสียเวลา เสียค่าไฟฟ้าในการบดเพิ่มขึ้น ทำให้การลงทุนในการผลิตเพิ่มขึ้น การบดให้ละเอียดจึงไม่จำเป็น

5.1.3 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบาผสมกากตะกรันอลูมิเนียม คือ อัตราส่วนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนขาว เท่ากับ 30:50:20 โดยผสมกับกากตะกรันอลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนวัสดุยึดประสาน : ทราย เท่ากับ 1 : 0.5 ซึ่งพบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28วัน เท่ากับ 53 กก/ซม^2 มีการดูดกลืนน้ำที่อายุ 28 วันเท่ากับ 485 กก/ลบ.ม และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 887 กก/ลบ.ม ซึ่งมีค่าจากการทดสอบทั้งหมดผ่านในเกณฑ์มาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1505-2541 ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ – อบไอน้ำ ชั้นคุณภาพ 4 ยกเว้น ส่วนการรั่วไหลของอลูมิน่าจากการทดสอบ TCLP มีค่า4.81 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าต่ำ (US EPA) ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตได้ มีค่าการนำความร้อนต่ำเท่ากับ 0.2022 วัตต์/เมตรเคลวิน สามารถนำไปใช้เป็นผนังเพื่อลดการนำความร้อนเข้าสู่อาคารได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาผลของขนาด ของกากตะกรันอลูมิเนียมหลาย ๆ ขนาดต่อปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้น

2) ควรมีการนำวัสดุเหลือใช้อื่น ๆ มาทำการผสมเพิ่มแทนเถ้าแกลบขาวและเถ้าลอย

3) ควรมีการศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาคของคอนกรีตมวลเบา เพื่อจะได้ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยา

4) ควรศึกษากากตะกรันจากโรงหลอมในที่อื่น จากหลาย ๆ โรงงานและหลาย ๆ แหล่งว่าจะมีผลกับตัวอย่างการทดสอบหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

1. George, E.T. and Mackenzie, D.S., 2003, **Handbook of Aluminum**, Marcel Dekker, p.116.

2. วิริยะ ธารพันธุ์, 2549, **การนำโคลนปูนจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมาใช้แทนทรายในการผลิตคอนกรีตมวลเบา**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

3. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551, [Online], Available : www.diw.go.th], [9/5/2012].

4. ปณชัย โตวิชา, 2551, **ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อสภาพนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

5. บริษัทควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดักส์ จำกัด (มหาชน), 2547, **คอนกรีตมวลเบา.**

6. นราธิป จันทร์ทอง, สมิต ส่งพิริยะกิจ, เสรี เกียรติยุทธชาติ และอวิรทธิ์ ทัยทิมแท้, 2553, **การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของขี้เถ้าแกลบเพื่อใช้ในการทำคอนกรีต**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 7-11.

7. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด, 2547, **ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน**, กรุงเทพฯ, หน้า 2, 24 – 34, 47, 80 – 81, 181 – 183.

8. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C150 :Standard Specification of Portland Cement ", **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 4.01, pp.183-197.

9. Herrin, M. and Mitchell, H., 1961, **Lime Soil Mixture**, Washington D.C., Nation Academy of Sciences, pp. 99- 121.

10. ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547, **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**, สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ, หน้า 290 – 295.

11. ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2540, **คอนกรีตเทคโนโลยี**, พิมพ์ครั้งที่ 4, บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย อุตสาหกรรม จำกัด, หน้า 11-14.

12. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543, **การพัฒนาเพื่อนำเถ้าถ่านหินบดจากแม่เมาะไปใช้ในงาคอนกรีต รายงานฉบับสมบูรณ์**, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

13. Donna, L.Z. 2nd Ed., 1993, **Aluminium Castiog Technology**, American Foundrymcn's Society, U.S.A.

14. มนัส สถิรจินดา, 2538, **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก**, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพ, หน้า 2-8.

15. ส่วนอุตสาหกรรม 2 สานักนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 1, 2003, **International Aluminium Institute** [Online], Available : www.world-aluminium.org.

16. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2553, **ของเสียอันตราย**, พิมพ์ครั้งที่ 2, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, หน้า 541.

17. นิตยา เรืองฤทธิ์, 2545, **การหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโลหะโดยใช้ขี้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 29 – 30.

18. Kiattikomol, K., 1987, "A Study of Compressive Strength and Density of an Aerated Concrete", **KMUTT Research Reports**, Vol. 10, pp.18-34.

19. เจริญฤทธิ กรรณะพาหุ, จิระพันธ์ บางท่าไม้, สมบัติ ฐาปนาธีระ และประสิทธิ บัณฑรมงคล, 2532, **คอนกรีตพรุนโดยวิธีบ่มด้วยไอน้ำความดันสูง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

20. Tommy Y. Lo, W.C. Tang, and H.Z. Cui, 2006, The effect of properties on lightweight concrete, Hong kong", **Applied Thermal Engineering**, China, pp. 3025-3029.

21. P.Sukontasukkul, 1999, "Effect of ash on preformed foam and aluminum powder cellular concrete" **National Conference on Civil Engincdring**, Bangkok, Thailand, pp. MAT173-177.

22. Romazon Dmirboga, 2006, "Thermal conductivity and compressive strenght of concrete incorporation with mineral admixture", **Buildings and Enviromnent**, Turkey, pp. 2467-2471

23. จักรกริช กิตติปาลกุล, ธีรเดช ทิพย์วรธรรม และนันทนิษฎ์ วงศ์วัฒนา, 2540, **คอนกรีตพรุนโดยวิธีอบไอน้ำความดันสูง โดยใช้ปูนซิเมนต์ประเภท 1**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

24. ธนพล พูลคล้าย, วีรศักดิ์ ละอองจันทร์ และสถาพร เทียนรุ่งศรี, 2540, **คอนกรีตพรุนโดยวิธีบ่มด้วยไอน้ำความดันสูง โดยใช้ปูนซีเมนต์ประเภท3**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

25. ชลดล พึ่งธรรมจิตต์, 2549, **ผลกระทบของการแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

26. American Society for Testing and Materials, 1991, "ASTM C 230-08 : Standard Test Method for Flow Table for use in test of Hydraulic Cement", **In Annual Book of ASTM Standards**,Vol. 4.01, pp.178-182.

27. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C 109-11 : Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 4.01, pp.162-164.

28. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C 305-11 : Standard Practice for Mechanical Mixing Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 4.01, pp.188-190.

29. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C134 :Standard Test Method For Bulk Density of Hydraulic Cement", **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 4.01, pp.127-131.

30. United State Environmental Protection Agency, 1992, **Toxicity Characteristic LeachingProcedure (TCLP)**, SW-846, Appendix II- Method 1311.

31. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C177 -10: Standard Test Method For Bulk Density of Hydraulic Cement", **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 4.01, pp.160-161.

32. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1505-2541, **ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ – อบไอน้ำ**, กระทรวงอุตสาหกรรม, หน้า 1-12.

33. Quality Construction Products Public Company Limited, 2012, **Q-CON** [Online], Available : www.qcon.co.th /property/contrast], [9 / 5 / 2012].

26. American Society for Testing and Materials, 1991, "ASTM C 230-08 : Standard Test Method for Flow Table for use in test of Hydraulic Cement", **In Annual Book of ASTM Standards**,Vol. 4.01, pp.178-182.

27. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C 109-11 : Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 4.01, pp.162-164.

28. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C 305-11 : Standard Practice for Mechanical Mixing Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 4.01, pp.188-190.

29. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C134 :Standard Test Method For Bulk Density of Hydraulic Cement", **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 4.01, pp.127-131.

30. United State Environmental Protection Agency, 1992, **Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)**, SW-846, Appendix II- Method 1311.

31. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C177 -10: Standard Test Method For Bulk Density of Hydraulic Cement", **In Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 4.01, pp.160-161.

32. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1505-2541, **ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ – อบไอน้ำ**, กระทรวงอุตสาหกรรม, หน้า 1-12.

33. Quality Construction Products Public Company Limited, 2012, **Q-CON** [Online], Available : www.qcon.co.th /property/contrast], [9 / 5 / 2012].

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (Control) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนขาวเท่ากับ 80 : 20

อายุ (วัน)	ขนาด(ซม)		พื้นที่	น้ำหนักกด	แรง	กำลังรับแรงอัด	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	($ซม^2$)	Load(KN)	(กก)	($กก/ซม^2$)	($กก/ซม^2$)
3	5.05	5.1	25.76	48.81	4,881.00	189.52	184
	5.1	5.1	26.01	46.50	4,650.00	178.78	
	5.1	5.1	26.01	48.10	4,810.00	184.93	
7	5	5.1	25.50	47.16	4,716.00	184.94	189
	5.1	5	25.50	49.32	4,932.00	193.41	
	5.105	5.1	26.04	48.84	4,884.00	187.59	
14	5.1	5	25.50	56.67	5,667.00	222.24	240
	5	5.05	25.25	63.57	6,357.00	251.76	
	5.1	5.1	26.01	63.79	6,379.00	245.25	
28	5.1	5.1	26.01	66.97	6,697.00	257.48	256
	5.1	5.05	25.76	65.80	6,580.00	255.48	
	5	5.2	26.00	66.06	6,606.00	254.08	

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (Control-N) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนขาวเท่ากับ 80 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบในปริมาณร้อยละ 30โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	ขนาด(ซม)		พื้นที่ ($ซม^2$)	แรง (กก)	กำลังรับแรงอัด ($กก/ซม^2$)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย ($กก/ซม^2$)
	กว้าง	ยาว				
3	5.1	5.1	26.01	1,374.00	52.83	57
	5.1	5.2	26.52	1,641.00	61.88	
	5.1	5.05	25.76	1,423.00	55.25	
7	5	5.05	25.25	1,877.00	74.34	75
	5.1	5.1	26.01	1,943.00	74.70	
	5.1	5	25.50	1,955.00	76.67	
14	5.1	5	25.50	2,705.00	106.08	107
	5.1	5.1	26.01	2,809.00	108.00	
	5.105	5.1	26.04	2,688.00	103.24	
28	5	5.1	25.50	3,512.00	137.73	138
	5.1	5.05	25.76	3,543.00	137.57	
	5	5.1	25.50	2,844.00	111.53	

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (Control-S) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนขาวเท่ากับ 80 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก วัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	ขนาด(ซม)		พื้นที่	แรง	กำลังรับแรงอัด	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	($ซม^2$)	(กก)	($กก/ซม^2$)	($กก/ซม^2$)
3	5.1	5.1	26.01	1,170.00	44.98	52
	5.05	5.105	25.78	1,268.00	49.18	
	5.1	5.1	26.01	1,428.00	54.90	
7	5.1	5	25.50	1,777.00	69.69	73
	5.1	5.1	26.01	1,913.00	73.55	
	5.05	5.105	25.78	1,946.00	75.48	
14	5.1	5.05	25.76	2,605.00	101.15	103
	5.1	5	25.50	2,609.00	102.31	
	5.105	5.1	26.04	2,713.00	104.20	
28	5	5.1	25.50	3,346.00	131.22	135
	5.1	5.1	26.01	3,598.00	138.33	
	5.1	5.1	26.01	2,453.00	94.31	

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (CPFA) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20

อายุ (วัน)	ขนาด(ซม)		พื้นที่	แรง	กำลังรับแรงอัด	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	($ซม^2$)	(กก)	($กก/ซม^2$)	($กก/ซม^2$)
3	5.05	5.1	25.76	1,950.00	75.71	76
	5	5.1	25.50	1,891.00	74.16	
	5	5.1	25.50	1,980.00	77.65	
7	5.1	5.1	26.01	2,421.00	93.08	96
	5	5.105	25.53	2,504.00	98.10	
	5.1	5.05	25.76	2,499.00	97.03	
14	5.105	5.1	26.04	2,128.00	81.73	111
	5	5	25.00	2,780.00	111.20	
	5.1	5	25.50	2,845.00	111.57	
28	5.1	5.1	26.01	4,931.00	189.58	187
	5.1	5.1	26.01	4,732.00	181.93	
	5	5.1	25.50	4,850.00	190.20	

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (CPFA-N) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบในปริมาณร้อยละ 30โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	ขนาด(ซม)		พื้นที่	แรง	กำลังรับแรงอัด	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	($ซม^2$)	(กก)	($กก/ซม^2$)	($กก/ซม^2$)
3	5.05	5.1	25.76	678.00	26.32	21
	5.1	5	25.50	549.00	21.53	
	5	5.1	25.50	538.00	21.10	
7	5.1	5.1	26.01	683.00	26.26	27
	5.1	5.05	25.76	690.00	26.79	
	5	5	25.00	689.00	27.56	
14	5.1	5.1	26.01	1,130.00	43.44	44
	5.1	5.05	25.76	1,140.00	44.26	
	5	5.1	25.50	1,095.00	42.94	
28	5.05	5.1	25.76	1,578.00	61.27	62
	5	5.1	25.50	1,567.00	61.45	
	5.1	5	25.50	1,580.00	61.96	

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (CPFA-S) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	ขนาด(ซม)		พื้นที่	แรง	กำลังรับแรงอัด	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	(ซม^2)	(กก)	(กก/ซม^2)	(กก/ซม^2)
3	5.05	5.1	25.76	541.00	21.01	21
	5.1	5.1	26.01	527.00	20.26	
	5.1	5	25.50	769.00	30.16	
7	5.05	5.1	25.76	646.00	25.08	25
	5.1	5.1	26.01	630.00	24.22	
	5.105	5.1	26.04	680.00	26.12	
14	5.1	5.1	26.01	1,114.00	42.83	41
	5	5.05	25.25	1,046.00	41.43	
	5.1	5.05	25.76	1,007.00	39.10	
28	5.1	5	25.50	1,485.00	58.24	58
	5.1	5.05	25.76	1,470.00	57.08	
	5.05	5	25.25	1,493.00	59.13	

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (CRHA) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20

อายุ (วัน)	ขนาด(ซม)		พื้นที่	แรง	กำลังรับแรงอัด	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	($ซม^2$)	(กก)	($กก/ซม^2$)	($กก/ซม^2$)
3	5.05	5.1	25.76	1,223.00	47.49	48
	5.1	5.1	26.01	1,247.00	47.94	
	5.1	5.1	26.01	1,248.00	47.98	
7	5	5.105	25.53	2,067.00	80.98	79
	5.1	5.1	26.01	2,043.00	78.55	
	5.05	5.1	25.76	1,977.00	76.76	
14	5.1	5.105	26.04	2,442.00	93.80	93
	5.1	5.105	26.04	2,441.00	93.76	
	5.1	5.1	26.01	2,379.00	91.46	
28	5.1	5.1	26.01	2,838.00	109.11	101
	5.1	5.1	26.01	2,484.00	95.50	
	5.2	5.1	26.52	2,593.00	97.78	

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (CRHA-N) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	ขนาด(ซม)		พื้นที่ ($ซม^2$)	แรง (กก)	กำลังรับแรงอัด ($กก/ซม^2$)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย ($กก/ซม^2$)
	กว้าง	ยาว				
3	5.05	5.1	25.76	395.00	15.34	15
	5.1	5.1	26.01	376.00	14.46	
	5.1	505	25.75	367.00	0.14	
7	5.1	5.1	26.01	590.00	22.68	23
	5.05	5.1	25.76	605.00	23.49	
	5.2	5.05	26.26	570.00	21.71	
14	5.1	5.1	26.01	1,019.00	39.18	39
	5.1	5.1	26.01	1,020.00	39.22	
	5.05	5.1	25.76	998.00	38.75	
28	5.1	5.05	25.76	1,367.00	53.08	57
	5.1	5.1	26.01	1,492.00	57.36	
	5.1	5.1	26.01	1,486.00	57.13	

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (CRHA-S) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนขาว เท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	ขนาด(ซม)		พื้นที่	แรง	กำลังรับแรงอัด	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	($ซม^2$)	(กก)	($กก/ซม^2$)	($กก/ซม^2$)
3	5.1	5.1	26.01	287.00	11.03	10
	5.1	5.1	26.01	273.00	10.50	
	5.1	5	25.50	243.00	9.53	
7	5.05	5.05	25.50	590.00	23.13	18
	5.1	5.1	26.01	422.00	16.22	
	5.1	5.1	26.01	410.00	15.76	
14	5.105	5.1	26.04	892.00	34.26	36
	5	5.1	25.50	912.00	35.76	
	5.1	5.1	26.01	988.00	37.99	
28	5.1	5	25.50	1,292.00	50.67	53
	5.05	5.1	25.76	1,479.00	57.43	
	5.1	5.1	26.01	1,298.00	49.90	

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (Control) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนขาวเท่ากับ 80 : 20

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด(ซม)			ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก/ลบ.ม.)
		กว้าง	ยาว	สูง		
3	242	5.1	5.1	5.05	1,842.40	1,907
	250	5.1	5.1	5.05	1,903.30	
	251	5.1	5.1	5.05	1,910.92	
7	230	5.1	5.1	5.1	1,733.87	1,723
	233	5.2	5.1	5.1	1,722.71	
	227	5.1	5.1	5.1	1,711.26	
14	227	5.2	5.1	5.2	1,646.07	1,652
	225	5.2	5.1	5.2	1,631.57	
	220	5.1	5.1	5.1	1,658.49	
28	229	5.2	5.1	5.2	1,660.58	1,633
	223	5.1	5.2	5.1	1,648.77	
	219	5.105	5.1	5.2	1,617.61	

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (Control-N)ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนขาวเท่ากับ 80 :20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบในปริมาณร้อยละ 30โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด(ซม)			ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก/ลบ.ม.)
		กว้าง	ยาว	สูง		
3	190	5.1	5.1	5.05	1,446.51	1,441
	180	5.1	5.1	5.05	1,370.38	
	198	5.1	5.1	5.05	1,507.42	
7	178	5.105	5	5	1,394.71	1,365
	180	5.05	5.1	5	1,397.79	
	176	5.3	5.05	5.05	1,302.13	
14	175	5.05	5.1	5	1,358.96	1,341
	173	5	5.05	5.1	1,343.43	
	175	5.1	5.1	5.1	1,319.25	
28	176	5	5.1	5.105	1,352.00	1,327
	170	5	5	5.05	1,346.53	
	167	5	5.1	5.105	1,282.86	

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (Control-S)ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ปูนขาวเท่ากับ 80 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30โดยน้ำหนัก วัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด(ซม)			ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก/ลบ.ม.)
		กว้าง	ยาว	สูง		
3	192	5.1	5.1	5.1	1,447.41	1,434
	196	5.2	5.1	5.2	1,421.28	
	190	5.1	5.1	5.1	1,432.33	
7	180	5.1	5.1	5.05	1,370.38	1,360
	182	5.1	5.1	5.05	1,385.61	
	174	5.1	5.1	5.05	1,324.70	
14	178	5.1	5.1	5.1	1,341.87	1,327
	178	5.2	5.1	5.2	1,290.75	
	179	5.1	5.1	5.1	1,349.41	
28	182	5.2	5.2	5.105	1,318.47	1,316
	182	5.2	5.105	5.2	1,318.47	
	181	5.105	5.2	5.2	1,311.22	

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CPFA) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด(ซม)			ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก/ลบ.ม.)
		กว้าง	ยาว	สูง		
3	230	5.1	5.1	5.05	1,751.04	1,774
	235	5.1	5.1	5.05	1,789.11	
	234	5.1	5.1	5.05	1,781.49	
7	218	5	5.1	5	1,709.80	1,703
	224	5.1	5.1	5.1	1,688.64	
	227	5.1	5.1	5.105	1,709.58	
14	213	5.1	5.1	5.105	1,604.14	1,590
	214	5.1	5.1	5.2	1,582.23	
	214	5.05	5.1	5.2	1,597.90	
28	190	5.2	5.1	5.1	1,404.79	1,405
	213	5.2	5.1	5.1	1,574.84	
	190	5.2	5.1	5.1	1,404.79	

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CPFA-N) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบ ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด(ซม.)			ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก/ลบ.ม.)
		กว้าง	ยาว	สูง		
3	187	5.1	5.1	5.05	1,423.67	1,416
	187	5.1	5.1	5.05	1,423.67	
	184	5.1	5.1	5.05	1,400.83	
7	174	5.1	5.1	5.1	1,311.71	1,326
	177	5.1	5.1	5.105	1,333.02	
	177	5.1	5.1	5.1	1,334.33	
14	170	5.1	5	5.1	1,307.19	1,260
	165	5.1	5.1	5.1	1,243.87	
	171	5.05	5.2	5.1	1,276.82	
28	166	5.1	5.2	5	1,251.89	1,235
	170	5.1	5.1	5.1	1,281.56	
	160	5.05	5.1	5.1	1,218.11	

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CPFA-S) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าลอย : ปูนขาวเท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด(ซม)			ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก/ลบ.ม.)
		กว้าง	ยาว	สูง		
3	189	5.1	5.1	5.05	1,438.90	1,459
	194	5.1	5.1	5.05	1,476.96	
	192	5.1	5.1	5.05	1,461.74	
7	181	5.1	5.1	5	1,391.77	1,386
	185	5.1	5.1	5.1	1,394.64	
	182	5.1	5.2	5	1,372.55	
14	166	5	5	5.05	1,314.85	1,307
	164	5	5.05	5	1,299.01	
	169	4.905	5.2	4.9	1,352.22	
28	162	5.1	5.1	5.105	1,220.05	1,227
	167	5.1	5.2	5.1	1,234.73	
	169	5.2	5.1	5	1,274.51	

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CRHA) ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนขาว เท่ากับ 30 : 50 : 20

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด(ซม.)			ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก/ลบ.ม.)
		กว้าง	ยาว	สูง		
3	210	5.1	5.1	5.05	1,598.78	1,599
	210	5.1	5.1	5.05	1,598.78	
	222	5.1	5.1	5.05	1,690.13	
7	201	5.1	5.1	5.1	1,515.25	1,496
	199	5.1	5.1	5.1	1,500.18	
	198	5.1	5.1	5.1	1,492.64	
14	191	5	5.1	5.1	1,468.67	1,447
	188	5	5.1	5.1	1,445.60	
	181	4.9	5.1	5	1,448.58	
28	185	5.1	5.1	5.2	1,367.82	1,383
	188	5.1	5.105	5.1	1,415.86	
	189	5.2	5.1	5.1	1,397.39	

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CRHA-N)ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนขาว เท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมหยาบในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด(ซม)			ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก/ลบ.ม.)
		กว้าง	ยาว	สูง		
3	151	5.1	5.1	5.05	1,149.60	1,152
	151	5.1	5.1	5.05	1,149.60	
	152	5.1	5.1	5.05	1,157.21	
7	140	5.1	5.1	5.1	1,055.40	1,082
	144	5.105	5.05	5.105	1,094.16	
	144	5.1	5.05	5.1	1,096.30	
14	136	5.1	5.1	5.1	1,025.25	1,021
	136	5.1	5.1	5.2	1,005.53	
	137	5.1	5.1	5.1	1,032.79	
28	129	5.1	5.1	5.1	972.48	983
	134	5.1	5.1	5.1	1,010.17	
	132	5.105	5.1	5.1	994.12	

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา (CRHA-S)ใช้วัสดุยึดประสานที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : เถ้าแกลบขาว : ปูนขาว เท่ากับ 30 : 50 : 20 มีการเติมกากตะกรันอลูมิเนียมที่บดละเอียดในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด(ซม.)			ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)
		กว้าง	ยาว	สูง		
3	125	5	5	5.1	980.39	970
	125	5	5	5	1,000.00	
	120	5	5	5	960.00	
7	119	5.1	5.1	5.05	905.97	902
	118	5.1	5.1	5.05	898.36	
	123	5.1	5.1	5.05	936.43	
14	115	5.1	5	5.05	893.03	891
	116	5.105	5.1	5.1	873.62	
	120	5	5	5.1	941.18	
28	121	5.1	5.2	5.1	894.63	887
	119	5.1	5.2	5.1	879.84	
	120	5.105	5.105	5.1	902.86	

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Absorption) ของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน (Control, Control-N, Control-S)

ตัวอย่าง	น้ำหนักชิ้นตัวอย่างที่รวมน้ำหนักน้ำ (กก)	น้ำหนักชิ้นตัวอย่างแห้ง (กก)	น้ำหนักน้ำในชิ้นตัวอย่าง (กก)	ขนาด(ซม.)			ค่าการดูดกลืนน้ำ (กก/ลบ.ม.)	ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนน้ำ (กก/ลบ.ม.)
				กว้าง	ยาว	สูง		
Control	231.00	185.00	46.00	5.1	5.1	5.05	350	371
	231.00	186.00	45.00	5.1	5.1	5.05	343	
	236.00	181.00	55.00	5.1	5.1	5.05	419	
Control-N	183.00	131.00	52.00	5.1	5.1	5	400	392
	185.00	131.00	54.00	5.1	5.1	5.1	407	
	181.00	132.00	49.00	5.1	5.2	5	370	
Control-S	204.00	152.00	52.00	5	5	5.05	412	416
	208.00	155.00	53.00	5	5.05	5	420	
	204.00	152.00	52.00	4.905	5.2	4.9	416	

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Absorption) ของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน (CPFA, CPFA-N, CPFA-S)

ตัวอย่าง	น้ำหนักชิ้นตัวอย่างที่รวมน้ำหนักน้ำ (กก)	น้ำหนักชิ้นตัวอย่างแห้ง (กก)	น้ำหนักน้ำในชิ้นตัวอย่าง (กก)	ขนาด(ซม.)			ค่าการดูดกลืนน้ำ (กก/ลบ.ม.)	ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนน้ำ (กก/ลบ.ม.)
				กว้าง	ยาว	สูง		
CPFA	258.00	212.00	46.00	5.04	5.05	5.1	354	390
	255.00	210.00	45.00	5	5	5	360	
	258.00	200.00	58.00	5.09	5	5	456	
CPFA-N	193.00	141.00	52.00	5	5.07	5	410	418
	192.00	141.00	51.00	5	5	4.98	410	
	194.00	139.00	55.00	5.07	5	5	434	
CPFA-S	199.00	142.00	57.00	5.06	5.08	5.09	436	446
	202.00	145.00	57.00	5.08	5	5	449	
	202.00	144.00	58.00	5.02	5.1	5	453	

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (Absorption) ของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน (CRHA, CRHA-N, CRHA-S)

ตัวอย่าง	น้ำหนักชิ้นตัวอย่างที่รวมน้ำหนักน้ำ (กก)	น้ำหนักชิ้นตัวอย่างแห้ง (กก)	น้ำหนักน้ำในชิ้นตัวอย่าง (กก)	ขนาด(ซม.)			ค่าการดูดกลืนน้ำ (กก/ลบ.ม.)	ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนน้ำ (กก/ลบ.ม.)
				กว้าง	ยาว	สูง		
CRHA	202.00	142.00	60.00	5.1	5.1	5.105	452	454
	200.00	140.00	60.00	5.1	5.2	5.1	444	
	208.00	146.00	62.00	5.2	5.1	5	468	
CRHA-N	165.00	109.00	56.00	5	5	5.05	444	467
	167.00	107.00	60.00	5	5	5	480	
	169.00	108.00	61.00	5.1	5.1	4.9	479	
CRHA-S	154.00	91.00	63.00	5.1	5.06	5	488	485
	152.00	92.00	60.00	5	5.04	5.1	467	
	155.00	91.20	63.80	5	5.12	5	498	

ภาคผนวก ง.

ผลการทดสอบการรั่วไหลของอลูมิน่าของคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบการชะละลาย (Leachate Test) โดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP ตามมาตรฐาน (US EPA 1992) จะทดสอบโดยการใช้สารละลายชะละลายเป็นเวลา 1±2 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	การรั่วไหลของอลูมิเนียม (มิลลิกรัม/ลิตร)	เฉลี่ย (มิลลิกรัม/ลิตร)
Control-N	4.99	4.95
	4.76	
	5.11	
Control-S	4.20	4.31
	4.30	
	4.44	
CPFA-N	4.97	4.98
	4.97	
	4.98	
CPFA-S	4.89	4.96
	5.02	
	4.98	
CRHA-N	4.96	4.97
	4.96	
	4.99	
CRHA-S	4.77	4.81
	4.78	
	4.89	
	5.02	
	4.98	

ภาคผนวก จ.

ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ จ.1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบาโดยวิธี Thermal Constant Analysis (TCA) เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ Hot Disk Thermal Constant Analyser (Hot Disk AB)

ตัวอย่าง	การนำความร้อน (วัตต์/เมตร.เคลวิน)	การกระจ่ายความร้อน ($มม^2$/วินาที)	ความร้อนจำเพาะ (จูล/กิโลกรัม.เคลวิน)
Control-N	0.4523	0.2729	1,672
Control-S	0.3522	0.2589	1,573
CPFA-N	0.2876	0.2443	1,422
CPFA-S	0.2622	0.2345	1,234
CRHA-N	0.2529	0.2389	1,356
CRHA-S	0.2022	0.2189	1,173

หมายเหตุ :

1. Thermal conductivity is a measure of the ability to transmit heat through the material.
2. Thermal diffusivity is a measure of transient heat flow and is defined as the thermal conductivity divided by the product of specific heat times density.
3. Specific heat is the quantity of heat needed to raise the temperature of a unit mass of the substance 1 degree of temperature.
4. Hot Disk Thermal Constant Analyser (Hot Disk AB)

   Reproducibility - Thermal conductivity ± 2%

   - Thermal diffusivity ± 5%

   - Specific heat ± 7%

ภาคผนวก ฉ.

รูปตัวอย่างการทดสอบ

รูปที่ ฉ.1 ลักษณะการหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร

รูปที่ ฉ.2 ลักษณะการหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาขนาด 20 x 20 x 3 เซนติเมตร

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	นายวิรัตน์ พานทอง
วัน เดือน ปีเกิด	9 กันยายน 2517
ประวัติการศึกษา	
ระดับอาชีวศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ แผนกวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคสิงห์บุรี พ.ศ. 2536
	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง แผนกวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี พ.ศ. 2538
ระดับปริญญาตรี	ประกาศนียบัตรครูเทคนิคชั้นสูง วิชาเอกโยธา (การก่อสร้าง) วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี พ.ศ. 2542
ระดับปริญญาโท	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2554
ประวัติการทำงาน	ครูประจำแผนกวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี แห่งที่ 2
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	วิรัตน์ พานทอง, ธีระวุฒิ มูฮำหมัด และรุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัตน์ "สมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมกากของเสียอลูมิเนียมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาวและเถ้าลอย" **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17**, อุดรธานี, หน้า ENV 14.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่ 18 มิถุนายน พ.ศ.2555

ข้าพเจ้า นายวิรัตน์ พานทอง รหัส 53370408 เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญาโท หลักสูตรครุศาสตร์อุสาหกรรมบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี อยู่บ้านเลขที่ 34/1 ตำบลงิ้วราย อำเภออินทร์บุรี จังหวัดสิงห์บุรี รหัสไปรษณีย์ 16110 ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกูล คณบดี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมเทคโนโลยี เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์ และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์สมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมกากของเสียอลูมิเนียมที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบขาว และเถ้าลอย ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด และ ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัตน์ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ.2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญา ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรรผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้

เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วยการบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วยการบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ.....ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นายวิรัตน์ พานทอง)

ลงชื่อ.....ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.สิทธิชัย แก้วเกื้อกูล)

ลงชื่อ.....พยาน
(ดร.ธีระวุฒิ มูฮำหมัด)

ลงชื่อ.....พยาน
(นางกิ่งแก้ว ผลตระกูล)