คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาผสมวัสดุปอซโซลาน โดยระบบสองประสาน

Mechanical Properties of Pozzolans Material Lightweight Concrete by Binary Blend System

จักรพันธ์ แสงสุวรรณ

ปรัชญา ยอดดำรงค์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาผสมวัสดุปอซโซลาน
โดยระบบสองประสาน

Mechanical Properties of Pozzolans Material Lightweight Concrete by Binary Blend System

คณะผู้วิจัย	สังกัด
จักรพันธ์ แสงสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปรัชญา ยอดดำรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและดินขาวซึ่งมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้หินพัมมิซเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตมวลเบาและพิจารณาคุณสมบัติทางกล ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ทางด้านกำลังอัด กำลังดัด กำลังรับแรงดึงและแรงกระแทกของคอนกรีตมวลเบาโดยใช้เถ้าลอย (fly ash) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 ตามลำดับ และดินขาว (Meta-kaolin) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ากำลังแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน w/b = 0.55 ทุกส่วนผสม ให้ค่าสูงกว่าที่ 14 วัน ทุกส่วนผสม และ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด มากกว่า ทุกส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยและแทนที่ด้วยดินขาว เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัด แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงที่สุด 80 กก./ซม.^{2} มากกว่าคอนกรีตควบคุมและทุกๆ ส่วนผสมอื่น การทดสอบกำลังรับแรงดึงที่อายุ 28 วัน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 ที่อายุ 28 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงที่สุด 28 กก./ซม.^{2} ให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงมากกว่าทุกส่วนผสมของเถ้าลอย และมากกว่าการแทนที่ด้วยดินขาวร้อยละ 10 , 15 และ 20 จากการทดสอบกำลังรับแรงกระแทกที่อายุ 28 วัน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 ให้ค่ากำลังรับแรงกระแทกสูงที่สุด 92.00 จูลน์ มากกว่าที่ร้อยละ 20 และ 50 และให้ค่ากำลังรับแรงกระแทกสูงมากกว่าแทนที่ด้วยดินขาวทุกส่วนผสม ยกเว้นคอนกรีตควบคุม

Abstract

This research study the effect of pozzolanic materials on light weight concrete by replacement cement with fly ash and Meta kaolin which affect the properties of concrete by using pumics aggregate. Coarse in aerated concrete and consider mechanical properties. Aerated concrete replacement cement by fly ash 20%, 35% and 50% respectively, and meta-kaolin is replaced. From the results, it was found that the compressive strength of light weight concrete at 28 days, w/b = 0.55 was higher than that of every 14 days of cement and cement cement replacement by fly ash 50% highest value compressive strength. More than all the ingredients replaced with fly ash and Meta kaolin. When considering the flexural strength of replacement cement with 10% by Meta kaolin, the maximum flexural strength of 80 ksc was higher than that of control concrete and all other ingradient. Experimental tensile strength at 28 days result found that replacement cement by fly ash at 35% gave the highest tensile strength of 28 ksc and gave higher tensile strength than all other ingradient. From the impact strength test at age 28 days, it was found that the replacement cement 35% by fly ash gave the highest impact strength of 92.00 joule than the 20% and 50%, respectively, and higher impact strength than that of all kaolin. Except for control concrete.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่ริเริ่มและนำเสนอแนวคิดการนำวัสดุปอซโซลานที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งและสังเคราะห์นำมาใช้เป็นส่วนผสม แทนที่ซีเมนต์บางส่วนใน คอนกรีต โดยเฉพาะวัสดุที่ใช้เป็นมวลรวม หินพัมมิซเป็นวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติสามารถนำมาพัฒนาใช้ในงานคอนกรีตมวลเบา เพื่อลดพลังงานและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตซีเมนต์ ทั้งยังเป็นต้นแบบของงานวิจัยและพัฒนาให้บรรลุไปได้ด้วยดี และต้องขอขอบคุณคณะผู้ร่วมวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่า นที่สละเวลาในการประสานงานและติดต่องานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ที่ได้ให้ความกรุณาอนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้วิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์ศูนย์พระนครเหนือและเจ้าหน้าที่ห้องทดสอบทุกท่านของ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บางเขน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์ในด้านการใช้ห้องทดลองปฏิบัติการรวมถึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

นายจักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญ (ต่อ)	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญภาพ (ต่อ)	ซ
สารบัญตาราง	ฌ
บทที่1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ของการศึกษา	3
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัสดุเถ้าลอย	5
2.2 วัสดุดินขาว	11
2.3 คอนกรีตมวลเบา	14
2.4 หินพัมมิซ	15
บทที่ 3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	20
3.2 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ	20
3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตและสัญญลักษณ์	22
3.4 วิธีการทดสอบและปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4. วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ	
4.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)	29
4.2 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength)	30
4.3 การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength)	31
4.4 การทดสอบกำลังรับแรงกระแทก (Impact Strength)	33
บทที่ 5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของปอซโซลานคอนกรีตมวลเบา	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
บรรณานุกรม	39
ภาคผนวก ก.	41
ภาคผนวก ข.	49

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า	4
ภาพที่ 2.2 (ก) ลักษณะของเถ้าลอย (ข) ภาพถ่ายแบบส่องกราดของรูปร่างของเถ้าลอย	5
ภาพที่ 2.3 (ก) ลักษณะของดินขาว (ข) ภาพถ่ายแบบส่องกราดของรูปร่างของดินขาว	11
ภาพที่ 3.1 วัสดุประสานประกอบด้วย ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ เถ้าลอย ดินขาว และซิลิก้าฟูม	21
ภาพที่ 3.2 อนุภาคของเถ้าลอย และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยวิเคราะห์ด้วย XRF	21
ภาพที่ 3.3 ลักษณะของหินพัมมิซ ก) สภาพผิวแห้งและ ข) สภาพอิ่มน้ำ	22
ภาพที่ 3.4 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานของคอนกรีต ASTM C 39	24
ภาพที่ 3.5 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงผ่าซีก (Splitting tensile Strength) ตามมาตรฐานของ ASTM C 496	25
ภาพที่ 3.6 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C78-94 (Flexural Test)	26
ภาพที่ 3.7 การรับแรงกระแทกของคอนกรีตมวลเบา	26
ภาพที่ 3.8 แผนงานแสดงขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	28
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมกับปอซโซลานคอนกรีต	30
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตควบคุมกับปอซโซลานคอนกรีต	31
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตควบคุมกับปอซโซลานคอนกรีต	32
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตควบคุมกับปอซโซลานคอนกรีต	32
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตมวลเบา	33
ภาพที่ ก-1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	50
ภาพที่ ก-2 แบบหล่อคอนกรีต	50
ภาพที่ ก-3 ตัวอย่างใช้สำหรับทดสอบ	51
ภาพที่ ก-4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก	52

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a	6
ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่นรวมของมวลรวมน้ำหนักเบาชนิดโครงสร้าง ASTM C 330	15
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของหินพัมมิซ	16
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ Type I, PFA และ MK	21
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม (สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)	23
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร	24
ตารางที่ 4.1 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสม เถ้าลอย และดินขาวในระบบสองประสาน	29
ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาผสม เถ้าลอย ดินขาว	30
ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลเบาผสม เถ้าลอย ดินขาว	32
ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตมวลเบาผสม เถ้าลอย ดินขาว	33
ตารางที่ ก-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 14 วัน	42
ตารางที่ ก-2 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน	43
ตารางที่ ก-3 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังดึงที่อายุ 14 วัน	44
ตารางที่ ก-4 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังดึงที่อายุ 28 วัน	45
ตารางที่ ก-5 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 14 วัน	46
ตารางที่ ก-6 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน	47
ตารางที่ ก-7 ตารางบันทึกผลการทดสอบพลังงานกระแทกที่อายุ 28 วัน	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตมวลเบา เป็นวัสดุก่อสร้างได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในวงการก่อสร้างปัจจุบัน ซึ่งเป็นที่ยอมรับในด้านคุณสมบัติที่โดดเด่นและยังเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้ที่ต้องการลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วยเนื่องจากคอนกรีตมวลเบา มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากอิฐชนิดอื่นๆ (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม,2547) นอกจากสามารถนำไปใช้สร้างบ้านได้อย่างรวดเร็วแล้วยังส่งผลให้เกิดความประหยัดแรงงาน และลดต้นทุนในการดำเนินการก่อสร้าง รวมทั้งสามารถช่วยประหยัดพลังงานป้องกันความร้อนได้ดี มีความคงทนและมีอายุการใช้งานนานกว่า นอกจากนี้มีการใช้คอนกรีตมวลเบาทดแทนอิฐมอญหรืออิฐบล็อกมากขึ้นในงานก่อสร้างอาคารต่าง ๆทำให้ธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ที่ขยายตัว อย่างต่อเนื่องได้ส่งผลให้ ผลิตภัณฑ์ก่อสร้างทุกประเภทเติบโตโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบาหรือ อิฐมวลเบามีการใช้มานานในต่างประเทศ แต่ยังเป็นวัสดุก่อสร้างแบบใหม่ในประเทศไทย คอนกรีตมวลเบาได้รับการพัฒนาจากอิฐแดงหรืออิฐมอญ ซึ่งอิฐมอญ (brick) เป็นวัสดุที่นำมาใช้ด้านงานก่อสร้างเป็นเวลาช้านานมาแล้ว เป็นวัสดุก่อสร้างที่ผลิตจากทรายและดินเหนียว หรือทรายและหิน แข็งคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ขึ้นอยู่กับสัดส่วน และชนิดของวัสดุต่างๆที่ใช้ วิธีใช้และการผลิต เวลาและอุณหภูมิในการเผา เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น อิฐจะมีสีคล้ำ ความพรุน จะลดลงและความแข็งแรงของอิฐจะเพิ่มขึ้น ลักษณะที่ใช้งานแตกต่างจากคอนกรีตในเรื่องความแข็งแรงคืออิฐที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงมาก เพราะใช้งานก่อกำแพงหรืองานเพื่อความสวยงาม และ การทำอิฐสำหรับการก่อสร้างของคนไทยได้ทำกันมานานแล้ว โดยส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมครอบครัวในแถบชนบทซึ่งมีขนาดเล็ก วิจัยนี้ต้องการนำเสนอประเด็นที่สำคัญคือ ลักษณะของคอนกรีตมวลเบา คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา กระบวนการผลิต คอนกรีตมวลเบา และแนวทางในการประยุกต์และพัฒนาอิฐเพื่อเพิ่มมูลค่าวัสดุที่เหลือใช้ต่าง ๆ โดยจะแยกอธิบายตามประเด็นต่างๆ ดังนี้

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าร์ (Cellular Lightweight Concrete (CLC)) เป็นระบบการผลิตคอนกรีตมวลเบาภายใต้สภาวะปกติเหมือนกับคอนกรีตปกติที่อาศัยหลักการทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเหมาะสมและมีเสถียรภาพสูงขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตด้วยการเติมสารก่อฟองอากาศ(Pre-formed Stable Foam) วิธีนี้เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยที่คุณภาพของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับวัสดุองค์ประกอบ สัดส่วนผสมชนิดของสารก่อฟองอากาศและเทคนิคการผสมที่ถูกต้องเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาซึ่งเป็นการลดน้ำหนักของโครงสร้างลง รับกำลังได้อย่างเพียงพอ การดูดซึมน้ำต่ำการติดตั้งด้วยการตอกตะปูและการฝังพุกสามารถทำได้ง่ายเป็นต้น จากข้อดีดังกล่าวทำให้คอนกรีตมวลเบาได้รับความนิยมสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ภายใต้ข้อกำจัดทางด้านวัสดุดั้งเดิมที่ใช้อยู่ซึ่งโดยปกติจะเลือกใช้จากปูนซีเมนต์และทรายทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาวิจัยวัสดุทดแทนที่สามารถจัดหาได้ง่ายที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นส่วน

ประกอบของคอนกรีตมวลเบาได้ ดังมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตมวลเบา อาทิเช่น การนำวัสดุปอซโซลานมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เถ้าลอย และดินขาวผสมทรายเป็นต้น ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นตามมาตรฐานการทดสอบที่ใช้กับมวลรวมละเอียดสำหรับคอนกรีต [11]พบว่า ทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus,FM) เท่ากับ 2.60 ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏเท่ากับ 2.67 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.57 และหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,492 กก./ม.3 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำแล้วมีความใกล้เคียงกันมาก จึงต้องมีการประยุกต์ใช้สารผสมเพิ่มเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การนำวัสดุปอซโซลานมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาให้ดีขึ้นพร้อมทั้งแก้ปัญหาส่วนผสมคอนกรีตด้วยการใช้สารผสมเพิ่มซึ่งได้แก่ เถ้าลอยร่วมกันสารก่อฟองอากาศ และพิจารณาผลกระทบดังกล่าวที่มีต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตขึ้น

ดังนั้นจากคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีตมวลเบาที่มีดินขาวและเถ้าลอยเป็นส่วนผสมดังที่ได้กล่าวมานี้ประกอบกับในขบวนการผลิตปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นต้องใช้พลังงานที่สูงมากซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศและก่อให้เกิด ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) จึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ลดน้อยลง โดยให้ความสนใจในการศึกษาทำวิจัยโดยพยายามใช้วัสดุที่เหลือทิ้ง (by Product) จากภาคอุตสาหกรรมเกษตรกรรมและจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทดแทนปูนซิเมนต์

ในการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงการพัฒนาอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของดินขาวและเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านของกำลังแรงอัด และกำลังดัด ของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงสำหรับรับแรงกระแทกได้ดีและเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 หาความสัมพันธ์ของที่เหมาะสมของปริมาณดินขาวและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสำหรับกำลังอัด และกำลังดัดในระบบสองประสานของคอนกรีตมวลเบา

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจาก เถ้าลอย กับดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

1.2.3 หาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่มีความสัมพันธ์ของสัดส่วนผสมของเถ้าลอยกับกำลังอัด กำลังดัด ในระบบสองประสานของคอนกรีตมวลเบา

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมหินพัมมิซ เช่น ความหนาแน่น (density) การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) การคละขนาด (Gradation)
1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของหินพัมมิซผสม เถ้าลอยและดินขาวระยะเวลาการก่อตัว (Seting Time) และการยุบตัว (Slump Test)
1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของหินพัมมิซ ผสม เถ้าลอยและดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น กำลังอัด กำลังรับแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ

1.4 ประโยชน์ของการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้เป็นประโยชน์และองค์ความรู้ในการวิจัยสำหรับการตัดสินใจที่จะนำเอาวัสดุประสานประเภทปอซโซลานมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต เพื่อที่เพิ่มประสิทธิภาพถึงพฤติกรรมการรับแรงกระแทก แรงดัด ลักษณะวิบัติ หน่วยแรงยืดเหนี่ยว ความคงทนและอายุการใช้งานเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตในด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันมากในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานจำนวนมากซึ่งมีผลกระทบทำให้เกิดก๊าซที่มีผลต่อภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีความพยายามจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง และได้พยายามที่จะพัฒนาสารซีเมนต์โดยใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักให้มีประสิทธิภาพที่สม่ำเสมอสำหรับนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยการนำวัสดุเหลือทิ้ง (by product) นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นที่ทราบกันดีว่าแล้วว่าคอนกรีตมีปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งได้จากการใช้พลังงานในการเผาไหม้ที่อุณภูมิสูงมากประมาณ1400-1600 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สารประกอบหลักทางเคมีเช่น ซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งในขบวนการผลิตปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานที่สูงมากซึ่ง จะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศมีผลทำให้เกิด ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นจึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยในปัจจุบันได้มีการทำวิจัยกันอย่างกว้างขวางโดยพยายามใช้วัสดุที่เหลือทิ้ง (by Product) จากภาคอุตสาหกรรมเกษตรกรรมและจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งวัสดุที่ใช้ผสมเป็นวัสดุปอซโซลานที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานแต่เมื่อผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้และที่ใช้กันมากได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ดินขาว (Metakaolin) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash)ซึ่งคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ทำจากปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลานมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น (Metha,1977)

ภาพที่ 2.1 เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า
ที่มา: bhrede.en.alibaba.com

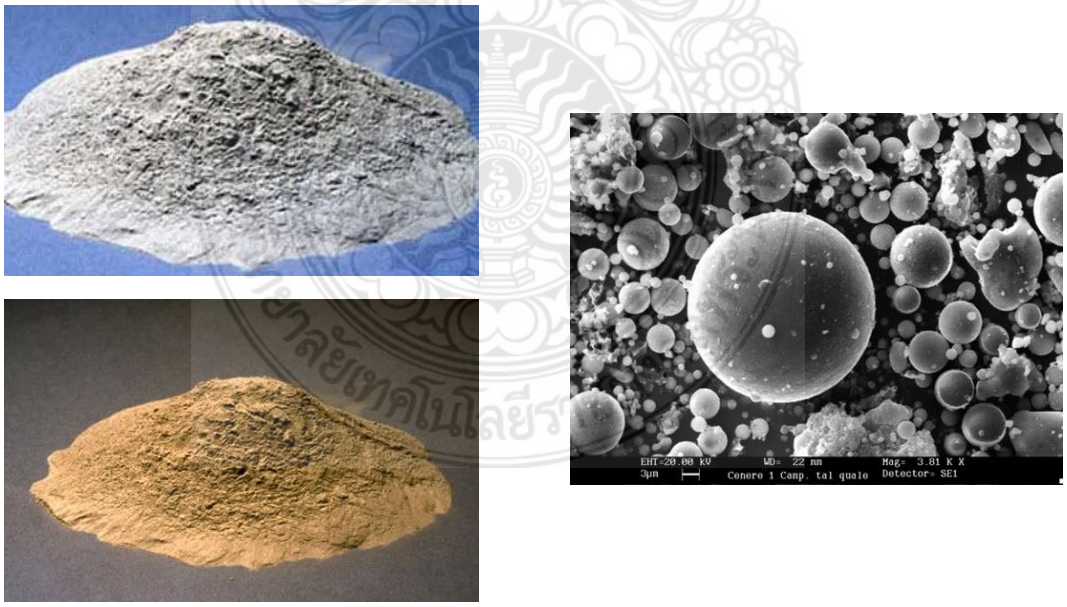
2.1 วัสดุเถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหิน รูปที่ 2 โดยเถ้าลอยจะถูกดักจับเก็บไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทาดำหรือน้ำตาลมีส่วนประกอบหลักเป็นอัยรูปของซิลิกาและอลูมินาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำได้สารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO2) อ ะลูมินาออกไซด์ (Al2O3) เหล็กออกไซด์ (Fe2O3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO3) เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหินที่ใช้, ความละเอียดของถ่านหินที่บดก่อนเข้าเตาเผา,อุณภูมิและความร้อนจากการเผา

2.1.1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2),อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3), คัลเซียมออกไซด์ (CaO), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงประมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอยและขบวนการผลิตเมื่อเปรียบเทียบเถ้าลอยแม่เมาะกับเถ้าลอยของต่างประเทศความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนคือปริมาณคัลเซียมออกไซด์ (CaO) ในเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะจะอยู่ระหว่าง 9-17 % ในขณะที่เถ้าลอยส่วนใหญ่ในต่างประเทศจะมี CaO อยู่ระหว่าง 2-7 % เท่านั้นองค์ประกอบโดยเฉลี่ยทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะในรอบ 10 ปีล่าสุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 1



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.2 (ก) ลักษณะของเถ้าลอย (ข) ภาพถ่ายแบบส่องกราดของรูปร่างของเถ้าลอย
ที่มา : bhrede.en.alibaba.com

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลม รูปที่ 3 บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม สีของเถ้าลอย ส่วนมากมีสีน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลและสีเทาถึงดำขนาดของอนุภาคเถ้าลอยจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร)จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.150 มิลลิเมตร)จากจุดเด่นของเถ้าลอยที่มีลักษณะกลมหลังจากทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในส่วนผสมของคอนกรีตแล้วจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคอนกรีตทำให้คอนกรีตไหลได้ดีและเนื้อคอนกรีตแน่นทึบ

2.1.3 ประเภทของเถ้าลอย

สำหรับข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a ได้กำหนดผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวต้องมีค่าอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับดังตารางที่ 2 ทั้งนี้การกำหนดดังกล่าวเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าในเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิด ปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างเพียงพอและยังมีความ สัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวด้วยและยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวในการเกิด Sulfate Attack ร้อยละของอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) กำหนดไว้ไม่เกิน 1.5%ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกร้าวจากผลของปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาในมวลรวมกับสารอัลคาไลน์ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวดัชนีกำลังเป็นค่าที่ บ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานโดยเปรียบเทียบกำลังอัดเป็นร้อย ละของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 7 และ 28 วันกับมอร์ต้าร์ถ้ามีค่าสูงแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูง

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$), min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI), max %	6.0	6.0
ดัชนีกำลัง, min %	75.0	75.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

2.1.4 ปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาเคมี2ขั้นตอนด้วยกันโดยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดขึ้นก่อนแล้วจึงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซิเมนต์เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำก็จะเริ่มขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดย

สารประกอบC_3SและC_2Sซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท

($3CaO.2Sio_2.3H_2O$:$C_3S_2H_3$) และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$: CH) ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$2\ C_3S + 6H \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$$
$$2\ C_3S + 4H \longrightarrow C_3S_2H_3 + CH$$

ที่มา : A. M. Neville. 1997. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc. New York.

สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรททำให้ซีเมนต์เพสท์เกิดเป็นวุ้น มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานมีความเหนียว ก่อตัว แข็งตัว และยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนคัลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ซีเมนต์เพสท์มีคุณสมบัติเป็นด่าง ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเครชั่นแล้ว ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้น โดยหลักๆแล้วจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาออกไซด์ (SiO_2 : S) ที่มีอยู่ในเถ้าลอยกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นคัลเซียมซิลิเกตไอเดรทอีกดังนี้

$$xCH + yS + zH \longrightarrow C_xS_yH_{x+z}$$

ที่มา : Richard Helmuth. 1987. Fly ash in cement and concrete. Portland cement association, Skokie.

เอกสิทธิ์และวิศว (2542) พบว่าปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรทที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสท์ผสมเถ้าลอย จะมีค่ามากกว่าในซีเมนต์เพสท์ธรรมดาอันสืบเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย โดยซีเมนต์เพสผสมเถ้าลอย 15% จะมี CSH มากกว่าซีเมนต์เพสท์ธรรมดา 5% ที่อายุ 28 วันและ 10% ที่อายุ 56วัน

แคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง Helmuth (1987) พบว่าเมื่อคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุมากขึ้นช่องว่างใน CSH จะเล็กลง ความหนาของชั้นเถ้าลอยลดลงตามปฏิกิริยาปอซโซลานเกิด CSH มากขึ้น กำลังจึงมากขึ้น

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีความแตกต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์คือ

1. เป็นปฏิกิริยาที่เกิดช้ากว่า (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดหรือพื้นที่ผิวของวัสดุปอซโซลาน) ทำให้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่ำกว่า และมีการพัฒนากำลังช้ากว่า

2. เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ $Ca(OH)_2$ ส่วนปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกิริยาที่ผลิต $Ca(OH)_2$ ดังนั้นการเกิด ปฏิกิริยาปอซโซลานต้องรอให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นก่อน

3. ทำให้มีตัวเชื่อมประสานมากขึ้นซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดี ขึ้น เช่น คุณสมบัติด้านกำลังอัด ความทนทาน การต้านทานการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

ได้มีการศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงสำหรับใช้ในงานโครงสร้างครั้งแรก โดยThe Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ในปลายทศวรรษ 1980s (Malhotra, 1986) คอนกรีตชนิดนี้มีส่วนผสมเถ้าลอยมากกว่าซีเมนต์โดยน้ำหนักและปกติจะผสมที่อัตราส่วนW/B ประมาณ 0.3 กำลังของคอนกรีตในระยะต้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และมีการพัฒนากำลังและโมดูลัสความยืดหยุ่นในระยะหลังมากขึ้นมีการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) และการล้า (creep)ต่ำและมความทนทานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ(Langley et al., 1989; Carette et al., 1993; Bilodeau et al., 1994; Bisaillon et al., 1994) เชื่อกันว่าในการผสมเถ้าลอยมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก เถ้าลอยจะมีส่วนสำคัญในการเชื่อมประสาน (Berryet al., 1994) เถ้าลอยเป็นที่รู้จักในฐานะวัสดุปอซโซลานมานานโดยตัวเถ้าลอยเองแล้วมีคุณสมบัติน้อยหรือไม่มีคุณสมบัติทางการ เชื่อมประสาน(ASTM 618-94a, 1995) และไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตในงานโครงสร้างมักนิยมใช้แทนที่ซีเมนต์ในช่วง15% ถึง 25% (ACI Committee 211,1993; Berry et al., 1994) แต่เมื่อมีการใช้เถ้าลอยปริมาณที่สูงจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในการพัฒนากำลังและปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยทั่วไปปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างจะจำกัดประมาณ 20 ถึง25% ของวัสดุประสาน (Zhang, 1995) มาตรฐานในหลายประเทศยังคงจำกัดปริมาณมากที่สุดของเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างประมาณ 20 ถึง 25% ซึ่งในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานอาจจะยังคงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยบางส่วนอาจยังคงอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะหลังการบ่มเป็นเวลานาน (Zhang, 1995)

Berry et al. (1990) ศึกษากลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในเพสต์ที่ใช้เถ้าลอยปริมาณสูงแทนที่ซีเมนต์ โดยทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านกำลังอัดของมอร์ต้าทางรูปร่าง (morphology)โดยการใช้วิธี SEM ส่วนประกอบของส่วนของแข็ง(solid-phase)และระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยการใช้วิธี XRD และการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิ(thermal analysis) และส่วนประกอบของpore fluid โดยวิธี high-pressure extraction พบว่าในระบบเถ้าลอยปริมาณสูง (high-volume fly ash system) ทั้งปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีมีผลกระทบร่วมกันต่อความแน่น (density) และแรงยึดเหนี่ยวในเพสต์ ในช่วงต้นผลกระทบทางด้านกายภาพโดยการอุดตามช่องว่างและทางเคมีโดยมีผลต่อการเกิดettringite หรือการเกิด sulphoaluminate เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนากำลัง ในระยะยาวปฏิกิริยาไฮเดรชันมีอิทธิพลจากการเกิด silico-aluminate binder ที่เกี่ยวพันจากปฏิกิริยากับเถ้าลอยSivasundaram et al. (1989) ศึกษาการก่อตัวเริ่มต้น(initial setting time) และการก่อตัวสุดท้าย(final setting time) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง โดยมี W/C หรือ W/B เดียวกันพบว่าการก่อตัวเริ่มต้นสามารถเปรียบเทียบกันได้กับคอนกรีตควบคุมคือ7.5ชั่วโมงในขณะที่การก่อตัวสุดท้ายถูกหน่วงให้ช้ากว่าคอนกรีตควบคุมประมาณ3 ชั่วโมง Sivasundaram et al.(1991) รายงานว่าการหน่วงระยะเวลาก่อตัวสามารถเกิดขึ้นได้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงที่ผสมจากเถ้าลอยบางชนิด และการหน่วงระยะเวลาก่อตัวนี้ยังสัมพันธ์กับความเข้ากันได้ (compatibility)ระหว่างวัสดุประสานและ superplasticizer และเมื่อใช้ superplasticizer ในปริมาณสูงอาจทำให้เกิดการหน่วงระยะเวลาก่อตัวได้

Jiang (1999) ศึกษา interfacial zone และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง พบว่าหลังคอนกรีตอายุ 28 วันไม่มี transition zone ระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ให้เห็นอย่างชัดเจนและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและเพสต์ขึ้นกับกำลังของเพสต์ โดยเพสต์ที่มีกำลังสูงจะให้แรงยึดเหนี่ยวที่สูงตามไปด้วย

Atis (2001) ศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงโดยวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตภายใต้สภาวะการบ่มแบบadiabatic พบว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในเถ้าลอยคอนกรีตขึ้นกับระดับการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอยและปริมาณ Superplasticizer ที่ใช้เพื่อรักษาความสามารถในการทำงานได้การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ทำให้ลดระดับอุณหภูมิสูงสุดและเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่ของเถ้าลอยยิ่งเป็นการลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและsuperplasticizer สามารถชะลอระยะเวลาที่จะเกิดอุณหภูมิสูงสุดโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมเหมือนกันแสดงอุณหภูมิสูงสุดที่เท่ากันโดยไม่ขึ้นกับการใส่ superplasticizer

Lane and Best (1978) ศึกษาผลกระทบของการใช้ Superplasticizer ร่วมกับเถ้าลอยในคอนกรีต และได้สรุปว่า superplasticizer มีความเข้ากันได้กับเถ้าลอย โดยสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่เกิดผลเสียในคอนกรีต โดยเปอร์เซ็นต์การลดน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าความยุบตัวเท่ากันมีค่าไม่เกิน15% ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการลดน้ำมากกว่าสารลดน้ำมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้เปอร์เซ็นต์การลดน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีความข้นเหลวเท่ากันเนื่องจากในความข้นเหลวเท่ากันคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีน้ำส่วนเกินที่น้อยกว่าดังนั้นการเติมสารลดน้ำเพื่อนำน้ำส่วนเกินนี้มาใช้จึงมีผลกระทบที่น้อยกว่า

ประจิต (2526) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับคอนกรีต และศึกษากำลังรับแรงอัดโดยใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 0 ถึง50% อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.50, 0.75, 1.00 และ1.25 ตามลำดับจากการทดลองพบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ 29% ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 45 วัน ตามลำดับโดยคอนกรีตยังให้กำลังเท่าเดิม

2.1.5 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ที่อายุแรกๆของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดขึ้นน้อย กำลังอัดจึงขึ้นอยู่กับ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเป็นส่วนใหญ่ การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณซีเมนต์ลดลงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นน้อยลง กำลังอัดจึงน้อยลงตามปริมา ณเถ้าลอยที่มากขึ้น Babu (1994) พบว่าสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทุกๆค่าที่อายุ7วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่ากำลัง อัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามการผสมเถ้าลอย15% จะไม่มีผลในการลดกำลังลงมากนักซึ่งอาจเนื่องมา จากว่าเถ้าลอยสามารถอุดช่องว่างในคอนกรีตได้ดี ซึ่งกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงแรกๆ สามารถประเมินได้จาก ปริมาณของซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยจะต้องมีการปรับค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เนื่องจากการที่น้ำทำให้เถ้าลอยเปียกด้วย เมื่อ คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุมากขึ้นการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมนั้นเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เกิดเป็น CSH เพิ่มขึ้นอีกทำให้กำ ลังอัดเพิ่มมากกว่าคอนกรีตธรรมดาระยะเวลากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมากกว่าคอนกรีตที่ไม่

ผสมเถ้าลอยต้องรอ 1 ถึง 3 เดือน (Mokhtarzaden and French, 2000) นอกจากนี้ Helmuth (1987) พบว่าการผสมเถ้าลอยจนถึง 20% จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุมากกว่า 3-6 เดือนมีค่ามากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 30 และ 40% กำลังอัดจะมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างเห็นได้ชัด แม้ว่าคอนกรีตจะมีอายุมากกว่า 28 วันแล้วก็ตาม (Wajdi,1983)

สำหรับการนำเถ้าลอยแม่เมาะมาใช้ในงานคอนกรีตนั้นสามารถนำเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 30-40% โดยน้ำหนัก ซึ่งกำลังอัดที่อายุ 28 วันจะสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และที่ 91 วัน ยังเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 15-20% จากกำลังอัดที่อายุ 28 วัน (สมชัย, 2542) นอกจากนั้น ประจิต (2526) พบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ29% สำหรับคอนกรีตอายุ 28 และ 45 วันตามลำดับ โดยที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังเท่ากับคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย

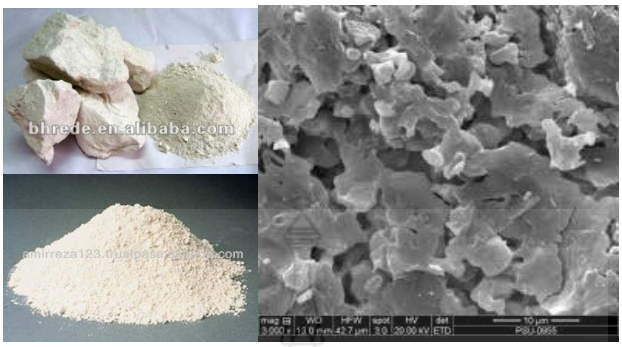
2.1.6 กำลังดัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าลอย

กำลังดัดของคอนกรีตนั้นเป็นกำลังดึงชนิดหนึ่ง ซึ่งกำลังดึงของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตมากถึงแม้ว่ากำลังดึงของคอนกรีตจะไม่ค่อยพิจารณาในการออกแบบ (เนื่องจากการสมมติให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้) แต่ก็มีความสำคัญเพราะการแตกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้นได้ง่ายจากแรงดึง กำลังดึงของคอนกรีตโดยทั่วไปแบ่งตามการทดสอบได้ 3 ชนิดดังนี้

1. กำลังดึงโดยตรง (Uniaxial tensile strength) เป็นการทดสอบโดยให้แรงดึงโดยตรงกับชิ้นตัว อย่างคอนกรีต
2. กำลังดึงบนระนาบแตกร้าว (Splitting tensile strength) การทดสอบนี้ใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกวางให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอนแล้วทดสอบโดยการให้แรงอัด
3. กำลังดัด (Flexural strength) เป็นการทดสอบคานคอนกรีตซึ่งจะหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตได้ในรูปของโมดูลัสแตกร้าว

วิธีการทดสอบทั้งสามนี้ให้ค่ากำลังที่ต่างกัน โดยกำลังดัดให้ค่าสูงสุด และกำลังดึงโดยตรงให้ค่าต่ำสุดเนื่องจากกำลังดัดและกำลังดึงบนระนาบแตกร้าวจะเกี่ยวข้องกับการกระจายของหน่วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งไม่ใช่กำลังดึงที่แท้จริง Raphael (1984) พบว่ากำลังดัดมีค่ามากกว่ากำลังดึงโดยตรงของคอนกรีต โดยกำลังดึงโดยตรงของคอนกรีตมีค่าประมาณ 3 ใน 4 ของกำลังดัด

ผลของการใช้เถ้าลอยต่อกำลังดึงขึ้นกับอายุของคอนกรีต โดยในระยะแรกการผสมเถ้าลอยจะทำให้กำลังดึงลดลง และจะทำให้กำลังดึงสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น Wajdi (1983) พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30 และ 40% กำลังดึง (Splitting Tensile Strength) จะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยในระยะแรกและหลังจาก 28 วัน ส่วนในคอนกรีตผสมเถ้าลอย 20% กำลังดึงในช่วงแรกจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยแต่ที่ 91 วันจะมีกำลังดึงสูงกว่ากำลังดึงของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่มีอายุ 28 วัน Kukubu (1975) พบว่าที่อายุ 28 วันขึ้นไป คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 25% จะมีกำลังดึงสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยที่กำลังอัดเดียวกัน L. Lam (1998) พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วน 15 ถึง 25% จะให้ผลดีต่อกำลังดึงมากที่สุด และเมื่อผสมเถ้าลอยมากขึ้นกำลังดึงที่อายุ 28 และ 56 วัน จะลดลงเล็กน้อย



ก) ข)

ภาพที่ 2.3 (ก) ลักษณะของดินขาว (ข) ภาพถ่ายแบบส่องกราดของรูปร่างของดินขาว
ที่มา : bhrede.en.alibaba.com

2.2 วัสดุดินขาว

ดินขาว ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) จัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการนำเอาดินขาวดิบจากธรรมชาติ ($Al_2SiO_5(OH)_4$) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยวิธีการเผาในช่วงเวลาและอุณภูมิที่เหมาะสมซึ่งโดยทั่วไปมีผลึกเป็นลักษณะเป็นอัยรูป (Amorphous) ไม่มีรูปร่างที่แน่นอนมีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเหล็กของดินขาวประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักและรองลงมาเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมรปริมาณที่แตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของดิน อนุภาคของดินขาวโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ1.5 ไมครอน (Balaguru,2001) ตามมาตรฐานASTM C168 ดินขาวเป็นสารปอซโซลานClass N (Raw or Calcined Pozzolan) เมื่อผสมในคอนกรีตดินขาวจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH_2)$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดสารประ กอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซิเมนต์กับน้ำทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น (Wild,1996) นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังและความคงทนที่สูงขึ้นปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ20 โดยน้ำหนัก (Wild, 1996 ; จิรวัฒน์,2546)

สำหรับในประเทศไทยมีรายงานในการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบโดยอนุพงษ์ (2543) ศึกษาศักยภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวดิบในประเทศไทยจาก 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งปราจีนบุรี ระนอง และ ลำ ปาง โดยนำ ดินขาวดิบมาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และแปรผันเวลาในการเผาคือ 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จากการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีกำ ลัง (Strength Activity Index) ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผา

พบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินขาวดิบทั้ง 3 แหล่งคือ เผาด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง

นอกจากนี้ Hengsadeekul (1995) ได้ศึกษาดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดลำ ปาง โดยนำดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวดิบที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) มาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่ากำ ลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้างมีค่าสูงกว่าดินขาวดิบบดร้อยละ 6.4 และได้ทำ การทดลองหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำ หรับการเผาคือ 800 องศาเซลเซียส (จิรวัฒน์,2546)

2.2.1 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2เกิดจากการทำ ปฏิกิริยาของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารประกอบหลักในดินขาวกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำทำให้ได้สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรทและคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรทในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้ (Mindess, 1981)

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

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

Murat (1983) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว โดยผสมดินขาวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส กับน้ำและคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสพบว่าเกิดสารประกอบ C4AH13, C3AH6, C2ASH8 และ CSH ซึ่งชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้นโดยสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$AS_2 + 6CH + 9H \longrightarrow C_4AH_{13} + 2CSH$$

(Metakaolin) (Lime) (Water) (Tetracalcium Aluminate Hydrate) (Calcium Silicate Hydrate)

$$AS_2 + 5CH + 3H \longrightarrow C_3\ AH_6 + 2CSH$$

(Metakaolin) (Lime) (Water) (Tricalcium Aluminate Hydrate) (Calcium Silicate Hydrate)

$$AS_2 + 3CH + 6H \longrightarrow C_2ASH_2 + CSH$$

(Metakaolin) (Lime) (Water) (Hydrate Gehlenite) (Calcium Silicate Hydrate)

ผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยน เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นสมบัติด้านกำลัง การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และ ความทนทาน เป็นต้น

มีรายงานการศึกษาระบุว่าปริมาณดินขาวที่ใช้เพื่อทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 15 - 20 โดยปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินขาว, พื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวและปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Oriol and Pera, 1995; Wild and Khatib, 1197; Kostuch et al., 1993) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และดินขาวในปริมาณร้อยละ 30 - 40 สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมด ภายในเวลา 28 วัน (Oriol and Pera, 1995)

ผลการศึกษาของ Wild et al. (1997) พบว่าเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวเพิ่มขึ้นจาก 12,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม เป็น15,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม จะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มสูงขึ้นไม่มีผลต่อกำลังอัดในระยะยาว (90 วัน)

2.2.2 ผลกระทบของดินขาวต่อกำลังของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวจะให้ค่ากำลังอัดที่ระดับหนึ่งแต่เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานร่วมผสมในคอนกรีตทั้งโดยวิธีการแทนที่ปูนซีเมนต์ (Replacement Method) หรือวิธีผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมของคอนกรีต (Addition Method) ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้น ความแตกต่างของกำลังที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารปอซโซลานนั้นๆ (ธีรราช และชัย, 2543)

Wild et al. (1996) ศึกษาผลกระทบของดินขาวต่อการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักและทำการบ่มในช่วงอายุ 1 - 90 วัน คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกปริมาณของการแทนที่และทุกช่วงอายุของการบ่มโดยปริมาณของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่เหมาะสมที่สุด คือร้อยละ 20 และสรุปว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวเกิดจากผลของ Microfiller Effect ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากผสมดินขาวลงในคอนกรีตและผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นชัดเจนที่สุดในช่วง 7 - 14 วันแรก นอกจากนี้ดินขาวยังมีส่วนช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในคอนกรีตในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากการผสม

Curcio et al. (1998) ทำ การศึกษาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาว โดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าผสมซิลิก้าฟูม (Silica Fume) ในปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ที่เท่ากัน และพบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่ามอร์ต้าผสมซิลิก้าฟูมโดยสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วง 28 วันแรก แต่ในระยะยาว (90 - 180 วัน) ค่ากำลังอัดจะมีความแตกต่างกันน้อยมากและจากการวิเคราะห์ Differential Thermal Analysis (DTA) หาปริมาณคัลเซียมไฮดรอไซด์พบว่าดินขาวที่ใช้การทดลองมีความไวในการทำ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกใกล้เคียงกับซิลิก้าฟูม

Sayamipuk (2000) ได้ศึกษาดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองในประเทศไทย โดยนำดินขาวดิบมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากการทดลองมอร์ต้าผสมดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90วัน พบว่าการแทนที่ซีเมนต์โดยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 30 จะให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ทั้งนี้นอกจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นอนุภาคของดินขาวยังมีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าเนื่องจากผลของ Microfiller Effect และจากการทดลองเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวในปริมาณที่เท่ากันโดยมีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสานต่างกันคือ 0.40 และ 0.50 พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 จะสูงกว่า 0.50 เนื่องจากอนุภาคของ ดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างในเนื้อมอร์ต้าและช่วยปรับปรุงในส่วนของ Interfacial Zone นอกจากนี้ยังพบว่าค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และแทนที่ซีเมนต์โดยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าควบคุมที่อายุการบ่ม 90 วัน ค่าการพัฒนากำ ลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลจากดินขาวช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ในช่วงอายุเริ่มต้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอื่น (Wild et al., 1996; จิรวัฒน์,2546)

2.3 คอนกรีตมวลเบา

ในงานก่อสร้างต่างๆ น้ำหนักคอนกรีตมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อโครงสร้าง จึงจำเป็นที่มีต้องมีการพิจารณาเพื่อลดน้ำหนักหรือความหนาแน่นของคอนกรีต น้ำหนักส่วนหนึ่งที่ใช้คิดคำนวณหาขนาดหน้าตัดและขนาดเหล็กเสริมเป็นน้ำหนักของอาคาร ถ้าสามารถทำให้หน้าตัดมีขนาดเล็กก็จะส่งผลต่อฐานราก และนอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงเมื่อมีการแทนที่วัสดุที่ของแข็ง โดยให้มีโพรงของอากาศไม่ว่าจะเป็นอนุภาคของมวลรวมที่เป็นมวลรวมเบา รูโพรงเล็กๆ ในซีเมนต์เพสต์ และรูโพรงระหว่างอนุภาคของมวลรวม คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมน้ำหนักเบาเรียกว่า คอนกรีตมวลรวมเบา ซึ่งอยู่ในประเภทของคอนรีตมวลเบา โดยทั่วไปความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาอยู่ระหว่าง 300 - 1,850 กก./ม.^{3} เกณฑ์ในการจำแนกขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเนื่องจากเห็นได้ชัดเจน ความหนาแน่นและกำลังเป็นสมบัติที่สำคัญและ ACI 213R-87 ใช้ความหนาแน่นของคอนกรีตในการแบ่งประเภทของการใช้ประโยชน์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ประเภทแรกคอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้างที่มีความห นาแน่นระหว่าง 1,350 – 1,900 กก./ม.^{3} ต้องมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 17 เมกกะพาสคาล ประเภทที่สองคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมีความหนาแน่นระหว่าง 300 – 800 กก./ม.^{3} ใช้ในงานที่ไม่ใช่โครงสร้าง จะใช้งานหลักเป็นฉนวนกันความร้อน และประเภทที่สามเป็นคอนกรีตที่อยู่ระหว่างคอนกรีตโครงสร้างและคอนกรีตความหนาแน่นต่ำ ระเรียกว่า คอนกรีตกำลังปานกลาง อยู่ระหว่าง 7 – 17 เมกกะพาสคาล ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนพิเศษ

2.3.1 กำลังของคอนกรีตมวลเบา

อุปสรรคในการกำหนดปริมาณน้ำคือน้ำอิสระ (Free water) ในการใช้มวลรวมเบา ปริมาณน้ำอิสระที่ผสมไม่สามารถยอมรับได้ มวลรวมมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตและกำลังอัด เพราะปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่ามวลรวมเบาและน้ำโดยเฉพาะมวลรวมกำลังที่เพิ่มขึ้นความหนาแน่นก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวม คอ นกรีตที่มีกำลังอัด 20 เมกกะพาสคาล ใช้ปูนซีเมนต์ประมาณ 260 – 330 กก./ม.^{3} เช่นเดียวกับคอนกรีตที่มีกำลังอัด 40 เมกกะพาสคาล ปูนซีเมนต์ประมาณ 420 – 500 กก./ม.^{3} จากมาตรฐาน ACI 213R-87 ดังนั้นถ้าต้องการให้กำลังอัดสูงต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก

ในส่วนของการคละขนาดของมวลรวมเบามีมาตรฐานแตกต่างจากมาตรฐาน ASTM C 33 โดยใช้มาตรฐานเฉพาะตามมาตรฐาน ASTM C 330, C 331, C 332 พร้อมทั้งความหนาแน่นรวมดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่นรวมของมวลรวมน้ำหนักเบาชนิดโครงสร้าง ASTM C 330

เกณฑ์กำหนดขนาด	น้ำหนักมวลรวมแห้งสูงสุด กก./ม.^{3}
มวลรวมละเอียด	1,120
มวลรวมหยาบ	880
มวลรวมละเอียดกับมวลรวมหยาบ	1,040

2.4 หินพัมมิซ (Pumice)

2.4.1 หินพัมมิซ (Pumice) เป็นหินภูเขาไฟที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก มีน้ำหนักเบามาก มีลักษณะผิวขรุขระ มีความเหนียวแน่นเมื่อผสมกับกรวดและทราย รูพรุนในเนื้อหินพัมมิซทำให้สามารถลอยน้ำได้ มีอนุภาคเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึง 65 มม. แต่อนุภาคช่วง 1 – 16 มม. มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง หินพัมมิซสามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานได้เนื่องจากมีซิลิกาและอลูมินาเป็นจำนวนมากดังตารางที่ 2.3

หินพัมมิซมีสีอ่อน และสีเข้มที่เกิดจากลาวา สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง แต่หินพัมมิซที่มีสีอ่อนสามารถใช้ได้ดีกว่า เนื่องจากหินพิมมิซที่มีสีเข้มจะมีปริมาณซิลิกาต่ำกว่าหินพัมมิซที่มีสีขาว ดังนั้นการสังเกตสีผิวภายนอกของหินพัมมิซก็เป็นการประเมินสมบัติ ด้านวัสดุประสานแร่ผสมเพิ่มได้ในระดับเบื้องต้น (ดนุพล, 2539)

หินพัมมิซเกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ เมื่อหินเกิดการหลอมเหลวแล้วผสมกับก๊าซเกิดการประทุออกมา อนุภาคที่เบาจะปลิวตามทิศทางลม เมื่ออนุภาคเกิดการเย็นตัวตกลงบริเวณพื้นดิน ทำให้เกิดการสะสมของหินพัมมิซและมีขนาดใหญ่ขึ้น บางครั้งหินที่หลอมเหลวถูกปล่อยออกมาเป็น

ปริมาณมาก ทำให้ไหลออกและเกิดการรวมตัวที่บริเวณเชิงเขา โดยส่วนมากลาวาที่ทับถมสามารถที่จะนำไปใช้เป็นอิฐบล็อกในงานก่อสร้างได้โดยตรง

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของหินพัมมิซ

องค์ประกอบทางเคมี	สูตรทางเคมี	ปริมาณร้อยละ
ซิลิกา	SiO_2	55
อะลูมินา	Al_2O_3	22
แอลคาไลน์	$K_2O + Na_2O$	12
เหล็กออกไซด์	Fe_2O_3	3
ปูนขาว	CaO	2
แมกนีเซีย	MgO	1
ไททาเนีย	TiO_2	0.5

ที่มา : Grasser and Minke (1990)

หินพัมมิซพบส่วนมากบริเวณภูเขาไฟโดยเฉพาะบริเวณเชิงเขาในทิศทางเดียวกับลมพัด โดยส่วนใหญ่การทับถมเป็นแบบหลวมๆ มีความหนาประมาณ 50-300 เซนติเมตร ความหนาของหินพัมมิซลดลงเมื่อระยะห่างออกไปจากศูนย์กลางการระเบิด ขนาดอนุภาคหินพัมมิซที่เป็นผงอยู่ในช่วง 0-2 มม. ทราย 2-8 มม. และกรวด 8-65 มม. มีรูพรุนมากถึงร้อยละ 85 ซึ่งในร้อยละ 85 จะเป็นปริมาตรของอากาศและอีกร้อยละ 15 เป็นของแข็ง การที่หินพัมมิซมีรูพรุนสูงทำให้มีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีและมีน้ำหนักเบามาก (Grasser K. and Minke G. ,1990)

2.4.2 คุณสมบัติที่สำคัญของหินพัมมิซ

หินพัมมิซมีสมบัติที่ดีเยี่ยมในการใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง อันได้แก่ มีน้ำหนักเบามาก ราคาไม่แพง ทนความร้อนได้ดี มีความทนทาน ใช้งานง่าย ดูดซับเสียงได้ดี เป็นฉนวนกันความร้อนดังแสดงในรูปที่ 1.1 ในขณะเดียวกันก็มีสมบัติในด้านลบด้วยเช่นกัน ได้แก่ เมื่อใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมีกำลังอัดได้ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ เมื่อนำมาทำเป็นคอนกรีตตรงบริเวณขอบและมุมสามารถแตกหักได้ง่าย ขาดความคงทน เมื่อถูกน้ำจะเปื่อยยุ่ยได้ง่ายขึ้น หินพัมมิซไม่ควรนำไปใช้ในงานก่อสร้างประเภทต่อไปนี้ เช่น ฐานราก ใช้เป็นส่วนประกอบในส่วนที่สัมผัสน้ำ ใช้เป็นส่วนประกอบในส่วนที่การจราจรหนาแน่น เช่น บันได พื้น

สิ่งก่อสร้างจากหินพัมมิซ ส่วนประกอบในการก่อสร้างบ้านชั้นเดียว โดยก่ อสร้างจากหินพัมมิซสามารถใช้ เป็นวัสดุหลักของโครงสร้างหลายๆ อย่าง ดังต่อไปนี้ บ้านชั้นเดียว อพาร์ตเมนต์ โรงเก็บของ โรงเรียน เป็นต้น ในปัจจุบันหินพัมมิซถูกนำไปใช้เป็นจำนวนมาก ซึ่งปริมาณหินพัมมิซที่ใช้อยู่ทั่วโลกประมาณ 17.5 ล้านเมตริกตัน ปี 2005 เฉพาะประเทศอิตาลีประเทศเดียวใช้ประมาณ 4.6 ล้านเมตริกตันต่อปี ประเทศที่มีการใช้หินพัมมิซในปริมาณมากอย่างเช่น ชิลี เอกวาดอ เอธิโอเปีย ฝรั่งเศส เยอรมนี กรีซ สเปน ตุรกีและอเมริกา ในปี 2005 อเมริกาใช้หินพัมมิซประมาณ 1.3 เมตริกตัน คิดเป็นเงินประมาณ 39 ล้านเหรียญสหรัฐ เพื่ อใช้มวลรวม

หินพัมมิซเป็นอิฐบล็อกมวลเบาและคอนกรีตโครงสร้างดังรูปที่ 1.3 มีการใช้มวลรวมเพื่อผลิตคอนกรีตมวลเบาในหลายประเทศทั่วโลก ในยุโรปหินพัมมิซถูกใช้ตั้งแต่ในสมัยโรมเมื่อ 2000 ปีที่ผ่านมา ซึ่งโครงสร้างจำนวนมากยังหลงเหลือมาถึงปัจจุบัน คอนกรีตหินพัมมิซเป็ นร้อยละ 3 ของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้มากถึงร้อยละ 70 ในประเทศเยอรมนี (Hossain, 2008)

2.4.2 หินพัมมิซในประเทศไทย

สำหรับแหล่งหินพัมมิซในประเทศไทยยังมีจำกัด โดยพบเกิดเป็นหย่อมร่วมกับหินเพอร์ไลต์ ตามแนวรอยตะเข็บหินภูเขาไฟเก่าเป็นส่วนใหญ่ เช่น แถวลำนารายณ์ อำเภอชัยบาดาล สระโบสถ์ โคกเจริญ จังหวัดลพบุรีและนครนายก นอกจากนี้ยังพบในแถวจังหวัดอีสานตอนใต้ เช่น บุรีรัมย์ ศรีษะเกษ พบปะปนในหินตะกรันภูเขาไฟและหินบะซอลล์ (ดนุพล, 2539)

Cavaleri et al. (2003) ได้ศึกษาสมบัติบางประการของคอนกรีต มวลเบาหินพัมมิซ ถึงปัญหาทางโครงสร้าง ซึ่งผลการศึกษาพบว่าหินพัมมิซสามารถพิจารณาเป็นทางเลือกใช้เป็นมวลรวมเบาได้ โดยได้ทำการทดสอบในรูปแบบกำแพงในสามลักษณะและได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างแรงในแนวราบและแนวดิ่ง ผลการโก่งตัวด้านข้าง การแตกร้าว กำลังอัดสูงสุด แล้วทำการเปรียบเทียบผลในรูปชิ้นโครงสร้าง

Gunduz and Ugur (2005) ได้ศึกษาคอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้างเพื่อแก้ปัญหาน้ำหนักและความคงทนของอาคาร การนำมวลรวมหินพัมมิซผงละเอียดจากประเทศตุรกีและมวลรวมหินพัมมิซหยาบจากเกาะยาลีในทะเลเมดิเตอเรเนียนตะวันออก ได้วิเคราะห์ผลจากอัตราส่วนระหว่างมวลรวมหินพัมมิซละเอียดและมวลรวมหินพัมมิซหยาบผสมกับปูนซีเมนต์ที่มีต่อสมบัติคอนกรีตชนิดโครงสร้าง อัตราส่วนระหว่างมวลรวมหินพัมมิซกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนๆ กัน ได้แก่ 2:1, 2.5:1, 3:1, 3.5:1 และ 4:1 โดยน้ำหนักและปริมาณปูนซีเมนต์ 440, 375, 320, 280 และ 245 กก. / ม^3 ตามลำดับ หล่อเป็นตัวอย่างทดสอบส่วนผสมคอนกรีตมวลเบามวลรวมหินพัมมิซ (PALC) ให้มีค่าการยุบตัวตั้งแต่ 35 ถึง 45 มม. ผลจากการทดสอบเทียบกับคอนกรีตปกติ พบว่า PACL เบากว่าร้อยละ 30 – 40 ส่วนสมบัติอื่นๆ ที่มีค่าลดลง คือการดูดซึมน้ำและความลึกในการเกิดคาร์บอนแทรกซึม และอัตราส่วน A/C ต่ำ (ปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น) คุณภาพเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้างสามารถผลิตได้โดนใช้มวลรวมหินพัมมิซ ละเอียดและหยาบผสมกันโดยปราศจากการใช้สารเติมแต่งและสารผสมเพิ่ม

Gunduz (2007) ได้ศึกษาวิจัยคอนกรีตมวลเบาแบบกลวงมีส่วนผสม 22 แบบหล่อในเบ้าที่กระทุ้งแบบสั่น แกะแบบออกและเก็บเพื่อทำการบ่ม 96 วัน ในสภาพอากาศปกติ คอนกรีตก่อฉาบมวลรวมเบากลวงผลิตตามคุณลักษณะ BS 1881 อัตราพื้นที่เนื้อคอนกรีตและปริมาตรเนื้อของคอนกรีตคือ 53.57% และ 61.46% ตามลำดับ โดยคำนึงถึงความเหมาะสมของคอนกรีตในพจน์ของการสูญเสียกำลังอัดที่ใช้ผงหินพัมมิซด้วยเช่นกัน พบว่าคอนกรีตมีกำลังเพียงพอแต่มีค่าการดูดซึมน้ำมาก แต่ก็ยังสามารถใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วไปได้

Gunduz (2008) ได้ศึกษา การใช้มวลรวมเบาหินพัมมิซในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่สามารถรับแรงและไม่สามารถรับแรง ในการศึกษาใช้หินพัมมิซหล่อก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยหินพัมมิซหยาบขนาด 8 – 16 มม. หินพัมมิซปานกลางขนาด 4 – 8 มม. และขนาดละเอียด 0 – 4

มม. มีปริมาณหินพัมมิซหยาบร้อยละ 25 ขนาดปานกลางร้อยละ 25 และละเอียด 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นมวลรวมหินพัมมิซจากประเทศตุรกี วิเคราะห์ผลกระทบของอัตราส่วนต่างๆ ระหว่างมวลรวมหยาบ มวลรวมปานกลางและมวลรวมละเอียด กับปูนซีเมนต์ที่มีต่อสมบัติคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนมวลร วมหินพัมมิซกับปูนซีเมนต์ต่างกัน 6:1, 8:1, 10:1, 15:1, 20:1, 25:1 และ 30:1 โดยน้ำหนัก ใช้ปูนซีเมนต์ 180, 137, 110, 72, 52, 40 และ 32 กก. / ม.^{3} และกำหนดค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 2 – 4 ซม.

Hossain (2003) ได้ประเมินการศึกษาของเถ้าภูเขาไฟ (VA) กับผงพัมมิซ (VPP) เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ผสม ทำการทดสอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยเถ้าธุลีภูเขาไฟและผงพัมมิซในช่วงร้อยละ 0 ถึง 50 ได้ประเมินอิทธิพลจากสมบัติทางกายภาพและทางเคมีทางสมบัติปูนซีเมนต์ การทดสอบซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยทั้งสถานะสดและบ่ม การทดสอบ มาตรฐานดำเนินการด้วยส่วนผสม PC - VA และ VPP ต่าง ๆ กัน ได้ให้เหตุผลที่น่าพอใจเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์เถ้าลอย และทดสอบถึงศักยภาพว่าดีต่อการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าภูเขาไฟและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมผงพัมมิซที่มีเวลาการก่อตัวสูงขึ้นและปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ที่มีความร้อนต่ำ ซึ่งสามารถแทนที่ได้ร้อยละ 20

Hossain (2004a) ได้ตรวจสอบความเหมาะสมของการใช้หินพัมมิซเป็นวัสดุแทนที่ปูซีเมนต์และวัสดุหยาบในคอนกรีตมวลเบา ได้ควบคุมปูนซีเมนต์โดยการแทนที่ 0 % ถึง 25 % ของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักและโ ดยการแทนที่ 0 % ถึง 100 % ของวัสดุหยาบโดยปริมาตรได้สมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของหินพัมมิซรวมทั้งประเมินอิทธิพลที่เป็นไปได้ทั้งคอนกรีตและปูนซีเมนต์ที่อยู่ในสภาพที่แข็งและสด ผลการผสมแสดงให้เห็น ว่าสามารถผลิตปูนซีเมนต์จากหินพัมมิซได้ ซึ่งใช้เวลาการก่อตัวเร็วขึ้น 15 % ส่วนปริมาณมวลรวมหินพัมมิซทำเป็นมวลรวม ได้ประเมินผลจากการทดสอบถึงความสามารถในการทำงาน ความแข็งแกร่ง การหดตัวแบบแห้ง การดูดซับที่ผิวและความสามารถในการดูดซึมน้ำ สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตผสมหินพัมมิซมีกำลังอัดและความหนาแน่นที่เพียงพอ ที่จะยอ มรับให้เป็นคอนกรีตมวลเบาด้านโครงสร้าง แต่ยังคงมีความสามารถในการยืดหยุ่นต่ำ ความสามารถการดูดซึมน้ำการดูดซับที่ผิวมากกว่าคอนกรีตทั่วไป

Hossain (2004b) ได้นำหินพัมมิซจากประเทศปาปัวนิวกีนี (Papua New Guinea) มาตรวจสอบและประเมินค่าสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรม กำลังอัดคอนกรีตผสมที่ใช้หินนพัมมิซเป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ โดยหาความแตกต่างเป็นจำนวนร้อยละ ผลเป็นที่ยอมรับและเป็นที่น่าพอใจตามมาตรฐาน ASTM สำหรับคอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้าง ดัชนีปอซโซลานของงพัมมิซเป็นสารแต่งเติมปูนซีเมนต์ได้รับการตรวจสอบและเป็นที่ยอมรับตามรายงานมาตรฐานอิตาลี ดัชนีกำลังอัดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และประสิทธิภาพของสิ่งที่ใช้ในการผสมผงพัมมิซเป็นสารเติมแต่งของปูนซีเมนต์ในการควบคุมปฏิกิริยาแอลคาไล- ซิลิกา (alkali - silica) และการขยายตัวในภาชนะอบไอน้ำเป็นที่น่าพอใจตามมาตรฐาน ASTM

Lo et al. (2004) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมเบาหินพัมมิซที่มีความหนาแน่น 1,800 กก./ลบ.ม. ได้วิเคราะห์ผลกระทบต่อปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตอันได้แก่ การให้มวลรวมเบาชุ่มน้ำและจำนวนร้อยละของเถ้าลอยที่ใช้เป็นวัสดุแทนที่เนื้อประสานกำลังของมวลรวมเบาพบว่าตัวประกอบเบื้องต้นที่ควบคุมกำลังของคอนกรีตมวลเบากำลังสูง การเพิ่ม

ปริมาณเนื้อประสานจาก 420 ถึง 450 กก./ม.^{3} ไม่ได้เพิ่มกำลังของคอนกรีตมวลรวมเบาแต่อย่างใด ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกำลังดัดที่บ่ม 28 วัน แทนด้วยสมการ $fr = 0.69\sqrt{fc'}$ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นพบว่าลดลงมากกว่าคอนกรีตปกติจาก 20.3 มาสู่ 15 กิกะพาสคาล นอกจากนี้เถ้าลอยได้เพิ่มการยุบตัวและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลรวมเบา

ชูโชค ศิวะคุณากร (2536) จากการศึ กษาค่ายุบตัวของคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีค่าการยุบตัวโดยเฉลี่ยเท่ากับ 22.3 ซม. ในขณะที่คอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมมีค่ายุบตัวเฉลี่ย 14.7 ซม. แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 30 มีค่ายุบตัวเฉลี่ยเพียง 11 ซม. สำหรับการวัดค่ากำลังคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ผสม 450, 500 และ 550 กก. ต่อ ตร.ซม. และมีเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ที่อายุคอนกรีต 91 วัน ให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตอยู่ในช่วง 760-850 กก. ต่อ ตร.ซม.

Sahin et al. (2003) ได้ศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหิมพัมมิซและมวลรวมปกติ โดยกำหนดอัตราส่วนมวลรวมหินพัมมิซ ใช้หินพัมมิซแทนที่มวลรวมปกติร้อยละ 25,50,75 และ 100 โดยน้ำหนักและใช้ปูนซีเมนต์ 200,250,350,400 และ 500 กก./ม^3 และกำหนดค่าการยุบตัว 2-4,4-6 และ 6-8 เซนติเมตร ผลการทดสอบพบว่าเมื่อลดปริมาณมวลรวมหินพัมมิซความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 41.5 และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เข้าไปในส่วนผสมของคอนกรีต พบว่าความหนาแน่นและกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.2 และ 265 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ 200 กก./ม^3 ค่าการโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่ออัตราส่วนมวลรวมหินพัมมิซและปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น และสามารถปรับปรุงการดูดซึมน้ำเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์

Sahin et al. (2008) ได้ศึกษาการใช้มวลรวมหินพัมมิซในการผสมปูนซีเมนต์ ยิปซัม และปูนขาว โดยพิจารณาถึงกำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ เพื่อใช้ผลิตวัสดุก่อสร้างที่ใช้ปูนซีเมนต์ ยิปซัม และปูนขาว ให้น้อยลง

Sari and Pasamehmetoglu (2005) ได้เปรียบเทียบการใช้คอนกรีตมวลเบากับคอนกรีตปกติ ในการศึกษาปัญหาของคอนกรีตมวลเบาในพจน์ของกำลัง ความหนาแน่น สมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ โดยการเลือกขนาดคละของมวลรวมที่เหมาะสมใช้ทำเป็นคอนกรีตมวลเบา ผลการศึกษาคอนกรีตมวลเบาที่มีกำลังปานกลางที่ทำจากหินพัมมิซเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐาน *ACI* โดยศึกษากำลังและความหนาแน่นตามเกณฑ์มาตรฐานตุรกี TS 706 การเติมสารลดน้ำช่วยปรับปรุงอัตราส่วนกำลังต่อความหนาแน่นและความสามารถการเทของคอนกรีต จากผลการศึกษาก้อนคอนกรีตมวลเบามีกำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 6.56 นิวตัน/ม^2 และความหนาแน่น 1,300 กก./ม^3

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้เป็นการดำเนินการวิจัยประกอบด้วยวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยตลอดจนขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และวิธีการทดสอบอื่นๆที่เกี่ยวข้องในวิจัยนี้

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1. เครื่องทดสอบกำลังของคอนกรีต

3.1.2 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ขนาด 75 ตัน

3.1.3. แบบหล่อคอนกรีตตัวอย่าง

ทรงกระบอก 10 x 20 เซนติเมตร

ทรงลูกบาศก์ 10 x 10 x10 เซนติเมตร

รูปแบบคาน ขนาด 10 x 20 x 35 เซนติเมตร

3.1.4. เครื่องผสมคอนกรีตขนาดผสม 140-150 ลิตร

3.1.5. เครื่องจี้คอนกรีต (Vibrator)

3.1.6. อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump test)

3.1.7. ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 120 × 150 เซนติเมตร

3.1.8. เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม

3.1.9 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

3.1.10 โต๊ะทดสอบการไหลแผ่ (Flow table)

3.1.11 ชุดทดสอบการยุบตัว (Slump Test)

3.1.12 ตะแกรงสำหรับทดสอบ Mortar Bar เบอร์ 1, 3/8, 4, 8, 16, 30, 50, 100

3.1.13 เครื่องทดสอบ (Verza Test Machine) สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า

3.2 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.2.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

3.2.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

3.2.3 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

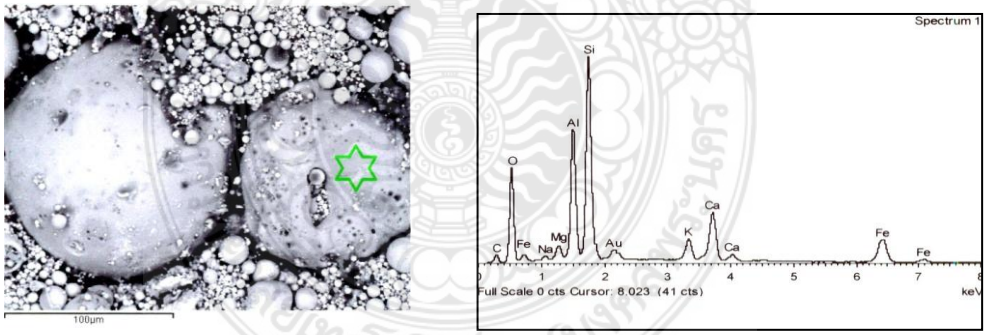
3.2.4 น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต (Water

3.2.5 วัสดุปอซโซลาน (เถ้าลอย และ ดินขาว) (เถ้าลอยจากโรงงานผลิตไฟฟ้า จ.ลำปาง และ ดินขาวเผาสำเร็จรูป นำเข้าจากสหัฐอเมริกา บริษัท Metamax จำกัด ตามรูปที่ 3.1

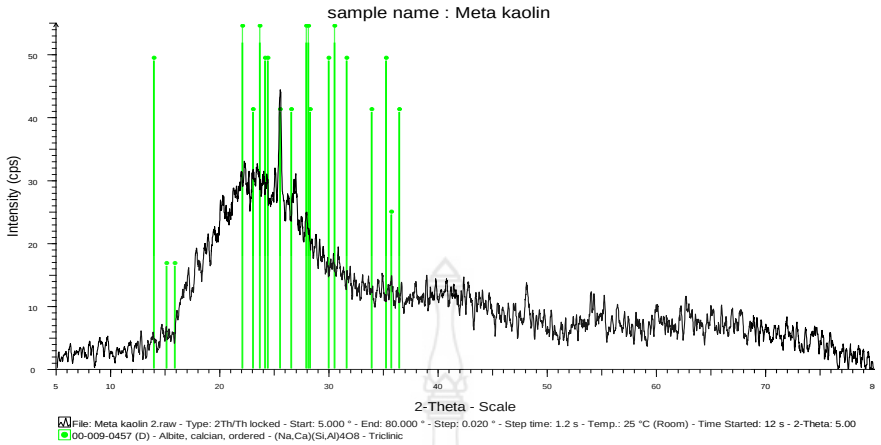
ภาพที่ 3.1 วัสดุประสานประกอบด้วย ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ เถ้าลอย และดินขาว

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ Type I, PFA และ MK

Oxides (%) / Characteristic		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO2	P_2O_5	SO_3	LOI
Cement	(OPC)	18.74	5.22	3.20	65.30	0.82	0.08	0.5	-	-		2.75
Fly ash	(PFA)	36.35	19.86	14.15	18.12	2.82	1.33	2.30	-	-		0.55
Meta kaolin	(MK)	51.49	45.74	0.37	0.02	< 0.00	0.30	0.23	1.79	0.06	0.08	-



ภาพที่ 3.2 รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอย และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยวิเคราะห์ด้วย XRF
อ้างอิง : ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัดมหาชน



องค์ประกอบทางเคมีของดินขาววิเคราะห์ด้วย XRF

ก) ข)

ภาพที่ 3.3 ลักษณะของหินพัมมิช ก) สภาพผิวแห้งและ ข) สภาพอิ่มน้ำ

3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตและสัญญลักษณ์

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยได้ถูกออกแบบตามการแนะนำของ ACI โดยออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ w/b = 0.55

OPC หมายถึง คอนกรีตธรรมดา

OPC/FA20 หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย20%

OPC/FA35 หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย35%

OPC/FA50 หมายถึง ปูนซีเมนต์/เถ้าลอย50%

OPC/MK10 หมายถึง หมายถึง ปูนซีเมนต์/ดินขาว10%

OPC/MK15 หมายถึง หมายถึง ปูนซีเมนต์/ดินขาว15%

OPC/MK20 หมายถึง หมายถึง ปูนซีเมนต์/ดินขาว20%

ตัวเลขต่อท้าย หมายถึง ปริมาณวัสดุปอซโซลานเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

3.4 วิธีการทดสอบและปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

3.4.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.15

- มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.51, ค่าร้อยละการดูดซึมเท่ากับ 1.30, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 4.00 และความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.65

- มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ใช้หินปูน ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มิลลิเมตร และขนาดเล็กที่สุดไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 6.26 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 56.70, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 0.5 ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 0.60 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 424 kg/m3

- น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm. ปราศจากกรด ด่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

- วัสดุปอซโซลาน (เถ้าลอยและดินขาว)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม (สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)

คุณสมบัติ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
หน่วยน้ำหนัก (Bulk Density) กก.ต่อ ลบ.ม.	-	424
ความดูดซึม (Absorption) เปอร์เซ็นต์	1.00	56.70
ความถ่วงจำ เพาะ (Apparent Specific Gravity)	2.60	0.60
โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus)	2.95	-

3.4.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตและการทดสอบทางกายภาพของมวลรวมประกอบด้วย

การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวม

- มวลรวมหยาบจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127
- มวลรวมละเอียดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128

เริ่มจากการศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุต่างๆโดยเฉพาะมวลรวมและวัสดุประสาน ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบขนาดคละ การดูดซึมน้ำ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นทั้งแบบหลวมและแบบอัดแน่น และโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหิน พัมมิซและทรายแม่น้ำจากงานวิจัย อาบีเด็ง ฮาวา , (2551) จากนั้นทำการค้นคว้าข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานแต่ละชนิด แล้วจึงทำการออกแบบส่วนผสม ในอัตราส่วนของวัสดุประสานคือ เถ้าลอย ร้อยละ 20, 35, 50 ดินขาว ร้อยละ *10,* 15, 20 แทนที่ปริมาณซีเมนต์ดังตาราง ที่ 3.3 โดยใช้อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.55 คงที่ตลอดการศึกษานี้ และนำก้อนตัวอย่างมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่อายุการบ่ม 14 และ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงโดยใช้แบบหล่อเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มม.สูง 200 มม.

จำนวน 7 ชุด การทดสอบกำลังรับแรงดัดใช้แบบหล่อขนาด 100x100x300 มม.จำนวน 7 ชุด และกำลังรับแรงกระแทกใช้แบบหล่อขนาด 40x40x160 มม.จำนวน 7 ชุด

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร

ส่วนผสม	W/B	MK (กก.)	FA (กก.)	ปูนซีเมนต์ (กก.)	น้ำ (กก.)	ทรายแม่น้ำ (กก.)	หินพัมมิซ (กก.)
M/control	0.55	0	0	373	229	608	264
M/FA20	0.55	0	75	298	229	608	264
M/FA35	0.55	0	131	242	229	608	264
M/FA50	0.55	0	187	187	229	608	264
M/MK10	0.55	37	0	336	229	608	264
M/MK15	0.55	56	0	317	229	608	264
M/MK20	0.55	75	0	298	229	608	264

3.4.2.1 ทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 10x20 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M เป็นคุณสมบัติเชิงกล ในการทดสอบทุกครั้งต้องทำการ Cap ก้อนตัวอย่างทั้ง 2 ด้านด้วยกำมะถันผลการทดสอบในแต่ละชุดใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบนี้จะได้ผลกำลังอัดประลัยที่กระทำบนหน้าตัดผิวเรียบสม่ำเสมอของตัวอย่างคอนกรีตโดยสามารถหากำลังอัดของตัวอย่างได้จากผลการทดลองจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3-1 ดังนี้

$$\text{Ultimate Compressive Strength, } f_c' = \frac{P_{max}}{A} \quad (9)$$

เมื่อกำหนดให้ P_{MAX} = น้ำหนักกระทำสูงสุด (กิโลกรัม)

A = พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)

ภาพที่ 3.4 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานของคอนกรีต ASTM C 39

3.4.2.2 การทดสอบการรับกำลังดึงแบบผ่า (Splitting tensile Strength)

การทดสอบการรับกำลังดึงแบบผ่าตามมาตรฐาน ASTM C496/C496M-4 ความสามารถในการรับกำลังดึงของคอนกรีตจะมีค่าต่ำมาก ประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัดประลัย การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาด 10x20 ซ.ม. วางให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอนบนเครื่องทดสอบแรงอัด ตัวอย่างคอนกรีตเมื่อรับแรงจะแตกในแนวดิ่งตามเส้นผ่าศูนย์กลาง จึงสามารถคำนวณกำลังต้านทานแรงดึงบนระนาบแตกร้าวนี้ได้ตามสมการที่ (12)

Splitting tensile Strength, $$f_t = \frac{2P}{\pi d} \qquad (12)$$

เมื่อกำหนดให้ P = น้ำหนักกระทำสูงสุด (กิโลกรัม)
L = ความยาวของตัวอย่าง (เซนติเมตร)
d = เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (เซนติเมตร)

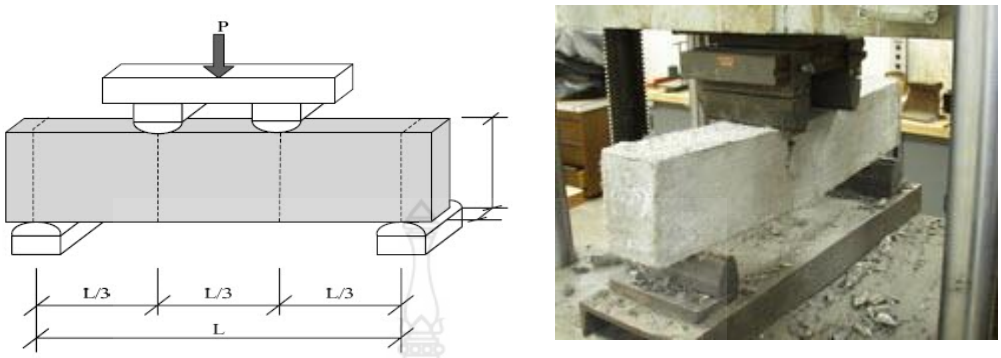
ภาพที่ 3.5 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงผ่าซีก (Splitting tensile Strength) ตามมาตรฐานของ ASTM C 496

3.4.2.3 การทดสอบการรับกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 1881 : Part 4 : 1970 โดยหล่อชิ้นตัวอย่างหน้าตัด 10x10x40 ซม.ทำการบ่มชิ้นตัวอย่างต่อเนื่องที่ 14 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังดัด โดยวางชิ้นตัวอย่างบนแท่นรองรับที่มีระยะระหว่างจุดรองรับ 20 ซม. แล้วให้น้ำหนักกดลงบนจุดกึ่งกลางของช่วงคานด้วยอัตราประมาณ 0.27 กก./ตร.ซม./วินาที จนชิ้นตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าที่ได้แล้วหาค่ากำลังดัด (f_b) ได้จาก

$$f_b = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ กก./ตร.ซม.}$$

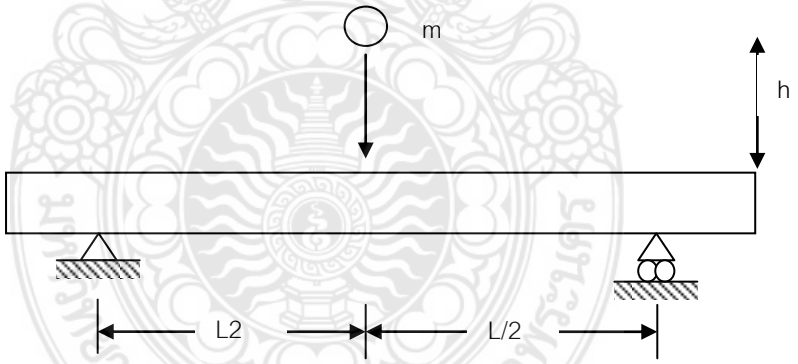
เมื่อ P = น้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อคาน(กก.)
B = ความกว้างของชิ้นตัวอย่างวัดที่บริเวณรอยแตก (ซม.)
d = ความลึกของชิ้นตัวอย่างวัดที่บริเวณรอยแตก (ซม.)
L = ระยะระหว่างฐานรองรับของแท่นทดสอบ (ซม.)



ภาพที่ 3.6 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C78-94 (Flexural Test)

3.4.2.4 การรับแรงกระแทกของคอนกรีตมวลเบา (Impact Strength)

กำลังแรงกระแทกจะมีความสำคัญมากเมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำที่มีความเร็ว เช่น การตอกเสาเข็ม หรือการกระแทกเนื่องจากมวลวัตถุที่มีความเร็ว กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตโดยทั่วไปจะพิจารณาจากความสารารถในการทนต่อแรงกระแทก หรือจำนวนครั้งของกระแทก หรือการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทก



ภาพที่ 3.7 การรับแรงกระแทกของคอนกรีตมวลเบา

พลังงานความเครียด (Strain energy,U)

$$U = \frac{1}{2}P.y \quad (1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของคาน

$$P = \frac{48EI}{L^3} \cdot y \quad (2)$$

แทน (2) ใน (1) จะได้

$$U = \frac{24EI}{L^3}.y^2 \quad (3)$$

จากพลังงานความเครียดเท่ากับงานที่ทำโดยวัตถุมวล m จะได้

$$\frac{24EI}{L^3}.y^2 = m(h+y) \quad (4)$$

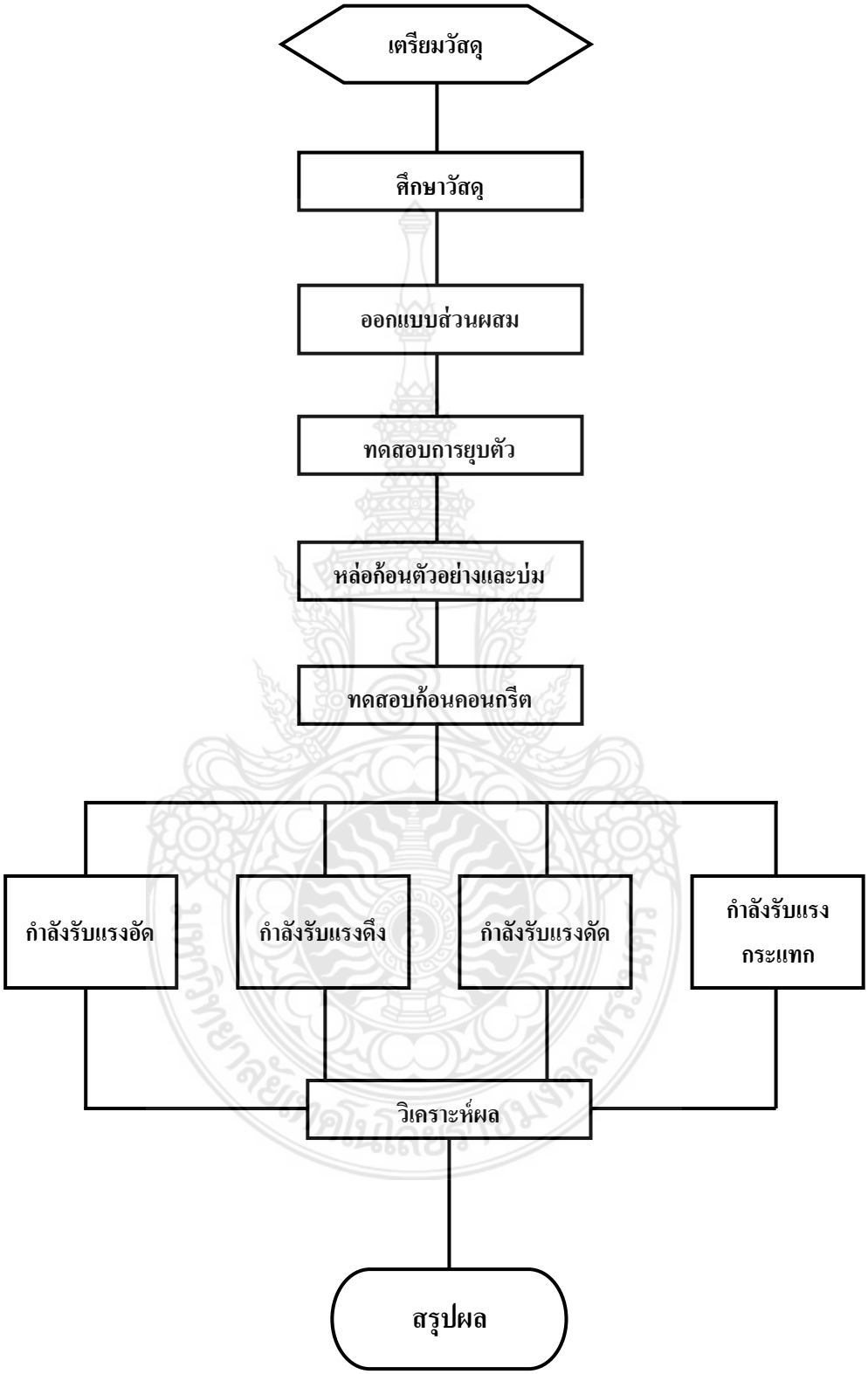
แก้สมการ (4) จะได้ y แทนใน (2) จะได้แรงสถิต (P) เทียบเท่าแรงกระแทก ดังนั้นหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากแรงกระแทก (σ) หาได้จาก

$$\sigma = \frac{MC}{I} = \frac{(PL/4)C}{I} \quad (5)$$

เมื่อ m คือน้ำหนักของวัตถุที่ปล่อยที่ความสูง h
h คือระยะที่ทำการปล่อยวัตถุ
L คือระยะระว่างจุดรองรับ
E คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของคาน
I คือโมเมนต์อินเนอร์เชียของพื้นที่หน้าตัดคาน
P คือแรงสถิตเทียบเท่าแรงกระแทก
y คือการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเนื่องจากแรงสถิต
M คือโมเมนต์ดัดสูงสุด
C คือระยะแกนสะเทินถึงขอบของหน้าตัด

กำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ อัตราการกระทำของแรง โดยกำลังของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราการกระทำของแรงสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าที่อัตราการกระทำของแรงช้า ความเครียดจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการคืบ (creep) เมื่อความเครียดถึงขีดจำกัดก็จะเกิดการวิบัติ แต่ที่อัตราการกระทำของแรงสูงจะได้รับผลจากการคืบน้อยลง กำลังจึงสูงกว่า ซึ่งผลของอัตราการกระทำของแรงจะมีผลต่อการดึงโดยตรงมากที่สุด มีผลต่อการดัดปานกลาง และมีผลต่อการอัดน้อยที่สุด (Suaris และ Shah, 1983) นอกจากนี้ Zielinski และ Reinhardt (1982) พบว่ากำลังรับแรงกระแทกจะมีค่าสูงกว่ากำลังสถิตเสมอ เนื่องจากคอนกรีตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานความเครียดได้ดีกว่า โดยในการทดสอบกำลังดึง (Splitting tensile strength) จะเห็นว่าการเพิ่มความเร็วในการกระทำของแรงต่อคอนกรีต กำลังรับแรงกระแทกจะมีค่าสูงกว่ากำลังแบบสถิตประมาณ 80% Harris และคณะ (2000) พบว่าอัตราส่วนกำลังดึงแบบพลศาตร์ต่อกำลังดึงแบบสถิต (Dynamic-static splitting tensile strength ratio) จะลดลงทีละน้อยเมื่อกำลังดึงมีค่าสูงขึ้น และอัตราส่วนนี้มีค่าตั้งแต่ 0.98 ถึง 1.73 m ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 ซึ่งผลการทดสอบจะมีความแปรปรวนมากขึ้นเมื่อกำลังดึงสูงขึ้น Green (1964) พบว่าการทดสอบกำลังอัดแบบแรงกระแทกจะมีการแปรปรวนของข้อมูลมากกว่าการทดสอบกำลังอัดแบบสถิตย์ เพราะขณะเกิดแรงกระแทกจะมีการกระจายของหน่วยแรงไม่สม่ำเสมอในช่วงเวลาอันสั้น

กำลังแรงกระแทกยังขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตด้วย โดยความ ต้านทานต่อแรงกระแทกของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ และความแข็งของมวลรวมหยาบ การใช้เถ้าลอยจะมีผลกระทบความต้านทานต่อแรงกระแทกทางอ้อมจากการมีผลต่อกำลังอัด (ACI 226, 1987) แต่ Welch และ Haisman (1969) พบว่ากำลังรับแรงกระแทกมีความสัมพันธ์กับกำลังดึงของคอนกรีตมากกว่ากำลังแรงอัด ดังนั้นมวลรวมหยาบมีเหลี่ยมมุมและผิวขรุขระแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ต้าร์จะสูงขึ้นทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่า



ภาพที่ 3.8 แผนงานแสดงขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

บทที่ 4

วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการการทดสอบ

การนำเสนอผลของโครงงานวิจัยนี้ เป็นการอธิบายการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของคอนกรีตในด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงและแรงกระแทกของปอซโซลานคอนกรีต

4.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบตัวอย่างทดสอบ ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 เซนติเมตร หล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 ค่า Load-Deflectionที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่ากำลังอัด

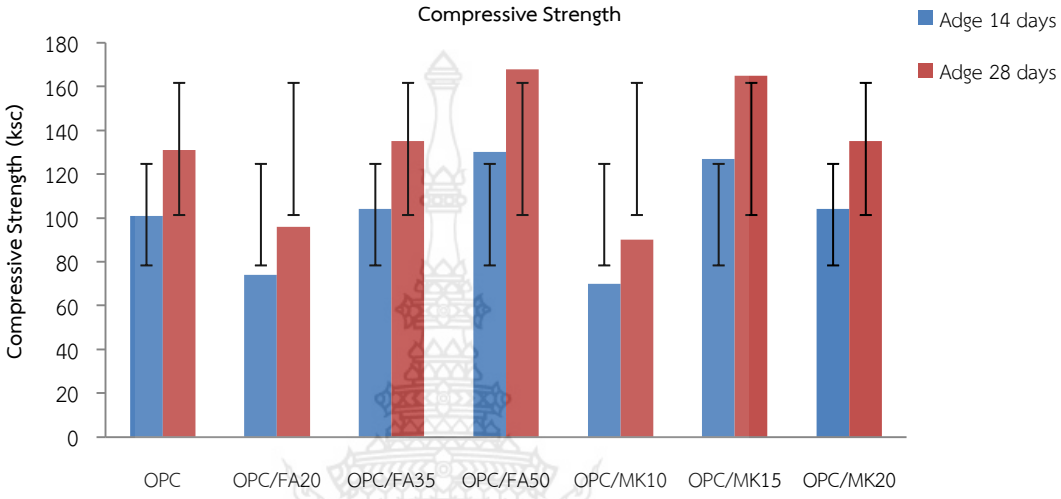
ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสม เถ้าลอย และดินขาวในระบบสองประสาน

No.	Mixed Proportion	Compressive Strength, ksc w/b =0.55	
		14 days	28 days
1	OPC	101	131
2	OPC/FA20	74	96
3	OPC/FA35	104	135
4	OPC/FA50	130	168
5	OPC/MK10	70	90
6	OPC/MK15	127	165
7	OPC/MK20	104	140

จากภาพที่ 4.1 พิจารณาการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันจะมากกว่า 14 วัน ทุกส่วนผสมและพบว่าเมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ OPC/FA50 (168 ksc), OPC/MK15 (165 ksc) และ OPC/MK20 (140 ksc) ตามลำดับ สรุปได้ว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะให้แนวโน้มกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น

สำหรับส่วนผสมปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์มีแนวโน้มที่ให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็น คุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความ

คงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุ ณสมบัติของคอนกรีตจะอยู่ที่ร้อยละ15-20 โดยน้ำหนัก



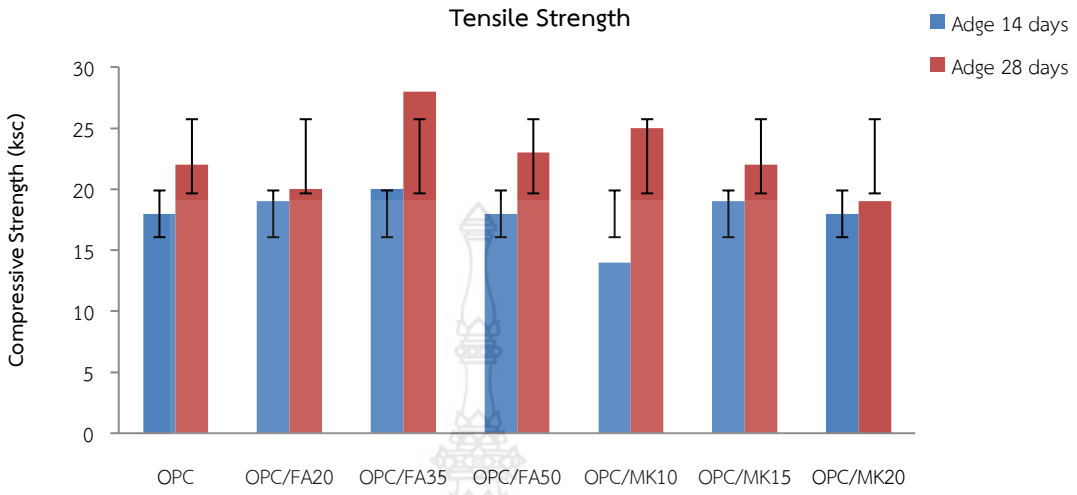
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมกับปอซโซลานคอนกรีต

4.2 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength)

การทดสอบกำลังดึงใช้ตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10x20 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C496 ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่ากำลังดึง

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาผสม เถ้าลอย ดินขาว

No.	Mixed Proportion	Tensile Strength, ksc	
		w/b =0.55	
		14 days	28 days
1	OPC	18	22
2	OPC/FA20	19	20
3	OPC/FA35	20	28
4	OPC/FA50	18	23
5	OPC/MK10	14	25
6	OPC/MK15	19	22
7	OPC/MK20	18	19



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตควบคุมกับปอซโซลานคอนกรีต

จากภาพที่ 4.2 พิจารณาการรับกำลังดึงของคอนกรีตที่อายุ 28 วันพบว่ากำลังดึงโดยเฉลี่ยมากที่สุดได้แก่ OPC/FA35 (28 ksc) OPC/MK10 (25 ksc) และ OPC/FA50 (23 ksc) ตามลำดับ

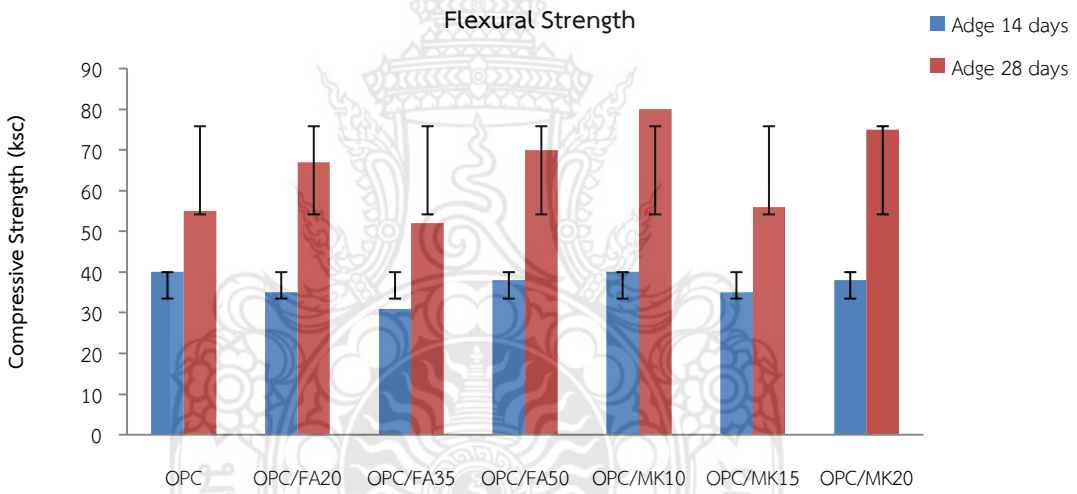
ปริมาณการแทนที่ของปอซโซลานเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ค่ากำลังดึงเพิ่มมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว ให้ค่ากำลังดึง มากกว่าเถ้าลอย เนื่องมาจากสาเหตุ ของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CAH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก

4.3 การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength)

การทดสอบกำลัง รับแรงดัดใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 15 x 15 x 100 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลัง รับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่ากำลังดัด

ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมวลเบาผสม เถ้าลอย ดินขาว

No.	Mixed Proportion	Flexural Strength, ksc	
		w/b =0.55	
		14 days	28 days
1	OPC	40	55
2	OPC/FA20	35	65
3	OPC/FA35	31	68
4	OPC/FA50	38	70
5	OPC/MK10	45	80
6	OPC/MK15	35	56
7	OPC/MK20	38	75



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตควบคุมกับปอซโซลานคอนกรีต

จากภาพที่ 4.3 พิจารณาการรับกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันพบว่ากำลังรับแรงดัดโดยเฉลี่ยมากที่สุดได้แก่ OPC/MK10 (80 ksc) OPC/MK20 (75 ksc) และ OPC/FA50 (70 ksc) ตามลำดับ

เมื่อปริมาณการแทนที่ของปอซโซลานเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงดัด เพิ่มมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว ให้ค่ากำลังรับแรงดัด มากกว่าเถ้าลอย เนื่องมาจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CAH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก

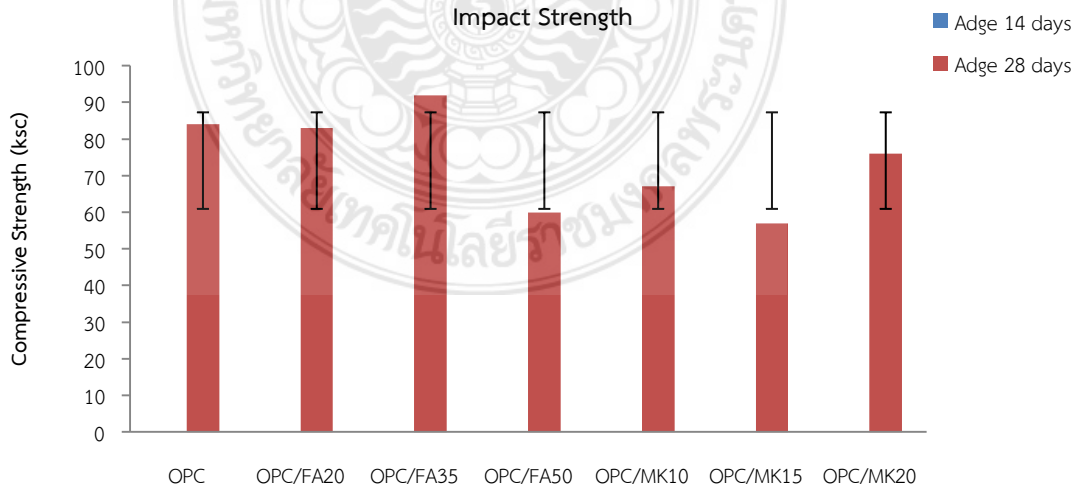
(Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก

4.4 การทดสอบกำลังรับแรงกระแทก (Impact Strength)

การทดสอบกำลัง รับแรงดัดใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 5 x 5 x 15 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลัง รับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่ากำลังดัด

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตมวลเบาผสม เถ้าลอย ดินขาว

No.	Mixed Proportion	Impact Strength, joule	
		w/b =0.55	
		14 days	28 days
1	OPC	-	84
2	OPC/FA20	-	83
3	OPC/FA35	-	92
4	OPC/FA50	-	60
5	OPC/MK10	-	67
6	OPC/MK15	-	57
7	OPC/MK20	-	76



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตมวลเบา

จากภาพที่ 4.4 พิจารณาการรับแรงกระแทก ของคอนกรีตที่ อายุ 28 วันพบว่ากำลังรับแรงกระแทกโดยเฉลี่ยมากที่สุดได้แก่ OPC/FA35 (92Joul) OPC/FA20 (83 Joul) และ OPC (84Joul) ตามลำดับ

เมื่อปริมาณการแทนที่ของปอซโซลานเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ค่ากำลังดึงเพิ่มมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอย ให้ค่ากำลัง กระแทกมากกว่าดินขาว เนื่องมาจากสาเหตุ ของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CSH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของ เถ้าลอยจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก(Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 20-35 โดยน้ำหนัก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้พิจารณาถึงผลของงานวิจัยเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของคอนกรีตในด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึง กำลังดัด และกำลังรับการกระแทกของคอนกรีตมวลเบาโดยใช้ หินพัมมิช เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมกับปอซโซลานคอนกรีตสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของปอซโซลานคอนกรีตมวลเบา

ผลการทดสอบพบว่าการแทนที่ปูนซิเมนต์ในระบบสองประสานจะให้แนวโน้มในด้านกำลังรับแรงอัดอัด แรงดึง โดยที่วัสดุประสานชนิดดินขาว จะมีแนวโน้มให้กำลังอัดและกำลังรับแรงดึงมากกว่าเถ้าลอยเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและพิจารณาได้จากการทดสอบดังนี้

5.1.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย พบว่าที่เถ้าลอยร้อยละ 50 ที่อายุบ่ม 14 วัน มีค่าเท่ากับ 130 กก./ซม.^{2} และที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 168 กก./ซม.^{2} ซึ่งมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมและมากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 35 ตามลำดับ เกิดจากปริมาณซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของเถ้าลอยมีปริมาณสูงซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อกำลังอัดของคอนกรีตมีผลต่อการเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Cement Hydraation) และปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) แนวโน้มอัตราส่วนแทนที่ลดลงกำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองของ ดนุพลกับจิตติยุทธ (2548)

ในส่วนของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาว พบว่าเมื่อแท นที่ดินขาวร้อยละ 15 ที่อายุ14 วัน มีค่าเท่ากับ 127 กก./ซม.^{2} และที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 165 กก./ซม.^{2} ซึ่งมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมและมากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ตามลำดับ ในขณะที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยดินขาวร้อยละ15 และสูงกว่าทุกส่วนผสม ทั้งนี้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 15 เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิกสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ ทำให้คอนกรีตกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

5.1.2 การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength)

จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตที่แทนปูน ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย พบว่าอัตราการแทนที่ปูซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงที่สุดทั้ง อายุการบ่ม 14 วัน เท่ากับ 45 กก./ซม.^{2} และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 80 กก./ซม.^{2} มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน และให้ค่ามากกว่าอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 50 จะเห็นได้ว่าเมื่อ

เพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากขึ้นและผ่านระยะเวลาบ่มน้ำที่นานจะให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้คอนกรีตมวลเบาหินพัมมัซมีค่ากำลังรับแรงดัดที่เพิ่มมากขึ้น

ส่วนของคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิซแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ10 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่ม 14 วัน เท่ากับ 45 กก./ซม.^{2} และ 28 วันให้ค่า เท่ากับ 80 กก./ซม.^{2} มีค่ามากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว ร้อยละ 15 และ 20 และทุกอัตราส่วน และยังมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม เป็นค่ากำลังรับแรงดัดที่มากสุดในการทดสอบนี้

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ของปอซโซลานเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ค่ากำลังดึงเพิ่มมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว ให้ค่ากำลังดึง มากกว่าเถ้าลอย เนื่องมาจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CAH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก(Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการ**แ**ทที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก

5.1.3 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength)

จากการทดสอบกำลัง รับแรงดึงของคอนกรีต มวลเบาแทนที่ปูนซีเมนต์ บางส่วนด้วยเถ้าลอย (Fly Ash) พบว่าการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 35 กำลังดึงที่อายุการบ่ม 14 วันมีค่าเท่ากับ 20 กก./ซม.^{2} และที่ 28 วัน เท่ากับ 28 กก./ซม.^{2} ซึ่งมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมและยังมีค่ามากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 20 และ 50 ทุกอายุการบ่ม

ในส่วนของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาว พบว่าเมื่อแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 10 ที่อายุการบ่ม 14 วัน มีค่าเท่ากับ 14 กก./ซม.^{2} และที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 25 กก./ซม.^{2} ซึ่งมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมและมีค่าค่ามากกว่าทุกส่วนผสม

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ของปอซโซลานเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ค่ากำลังดึงเพิ่มมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว ให้ค่ากำลังดึง มากกว่าเถ้าลอย เนื่องมาจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CAH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็น คุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก(Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการ**แ**ทที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก

5.1.4 การทดสอบกำลังรับแรงกระแทก (Impact Strength)

จากการทดสอบหาค่าพลังงานกระแทกคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิซโดยใช้การเหวี่ยงลูกตุ้มน้ำหนัก 15 กิโลกรัมกระแทกกับคอนกรีตตัวอย่างพบว่า พลังงานที่ใช้กระแทกคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิซแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 มีค่าเท่ากับ 92 จูล ซึ่งมากกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีค่า เท่ากับ 84 จูล และมีค่าพลังงานกระแทกมากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 50 มีค่าพลังงานกระแทก เท่ากับ 82 และ 60 จูล ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิซแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว พบว่าแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวอัตราส่วนร้อยละ 20 มีค่าพลังงานกระแทก เท่ากับ76 จูล มีค่ามากกว่าแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 10 และ 15 มีค่า เท่ากับ 67 และ 57 จูล ตามลำดับ แต่มีค่าพลังงานกระแทกที่น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ของปอซโซลานเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับการกระแทกเพิ่มมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว ให้ค่ากำลังกระแทก มากกว่าเถ้าลอย เนื่องมาจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CAH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็น คุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและทดสอบทางด้านคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพโดยใช้วัสดุปอซโซลานคอนกรีตในระบบ สองและ สามประสาน นั้น ผลจากการทดสอบ ที่ได้เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับแนวทางการนำ วัสดุปอซโซลานคอน กรีต ในระบบ สอง ประสาน มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ในงานคอนกรีต มีผลทำให้ช่วยลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ให้น้อยลงทำให้ลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งต้องใช้พลังงานในการผลิต เป็นอย่างมากก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมหรือภาวะเรือนกระจก (Green house effect) ทั้งนี้เป็นการนำเอาวัสดุที่เหลือทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ โดย แนวทางการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้เป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตในด้านความคงทนขอเสนอแนวทางไว้สำหรับผู้ที่สนใจทำการศึกษาเพิ่มเติม เช่น ความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีตเสริมเส้นใยต่างๆ การต้านทานต่อการกัดกร่อนโดยกรดซัลเฟต และอื่นๆ

ทั้งนี้กำลังต่างๆจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของวัสดุปอซโซลาน ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลามากขึ้นกำลังของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปอซโซลานจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคและปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 20 ถึง 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิค ที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ และสามารถปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสดและเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการ

เทได้เพิ่มขึ้น การที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีกำลังอัดในช่วงอายุต้น ๆ ต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคยังเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชย กำลังส่วนที่ลดลง เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ลดน้อยลง แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มกำลังอัดมีค่ามากขึ้นและอาจสูงกว่าคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นดินขาว ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังอัดและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณเถ้าลอยและดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุ ณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้ อยละ 30-40 และ ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนักตามลำดับ

บรรณานุกรม

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม(2547). อิฐมวลเบานวัตกรรมวัสดุก่อสร้างแบบใหม่ของวงการก่อสร้างไทย

จตุพร ชูตาภาและวรพจน์ แสงราม. (2552). “คอนกรีตมวลเบา” .**วารสารวิหารแดง.**1(2), กุมภาพันธ์2552 (อัดสำเนา).

จันทร์ฉาย ทองปิ่น. (2547).**โครงการพัฒนาวัสดุมวลเบาจากเส้นใยมะพราว.**เข้าถึงเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม2552 จาก http.//www.thaiwest.su.acth/templates/project 2547/1.html.

ไทยโฮมมาสเตอร์.(2552).**ก่อผนัง 2 ชั้นด้วยอิฐมวลดีอย่างไร.**เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2552 จาก http://www.thaihomemaster.com/showinformaton.phy?TYPE.

บริษัทไทยคอนส์เอนจิเนียริ่งคอนซัลแตนท์จำกัด. (2552).**อิฐมวลเบา**เข้าถึงเมื่อวันที่3 สิงหาคม2552 จาก htt://www.thaicontractors.com/cortent/cmenu/1/80 330.html.

โรงงานอิฐมอญพงษ์เจษฎา (2552).**อิฐมวลเบา ความรู้เรื่อง อิฐมวลเบา การนำอิฐมวลเบา.**เข้าถึงเมื่อวันที่20 กรกฎาคม 2552 จาก ttp://www.pongjadsada.com/articie/idb.aspx.

วิชิต สุวรรณปรีชา.(2552). **อิฐมวลเบาพารากรีต.** เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2552 จาก http://www.rabber.co.th/news216.

วัชระ เพิ่มชาติ.(2548).**การใช้ประโยชน์จากขี้เถ้าลอยสำหรับผลิตอิฐมอญ.**(อัดสำเนา).

วรรณา ต.แสงจันทร์.(2552). “การพัฒนาอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว”. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ**. 57 (179),มกราคม 2552 หน้า46-52.

วรพจน์ แสงรามและสันติภาพ เข็มแก้ว.(2552). “คอนกรีตมวลเบา”. **วารสารวิหารแดง.** 1(1), มกราคม2552 (อัดสำเนา).

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต พิมพ์ครั้งที่ 1. ตุลาคม พ.ศ. 2547

สุวิมล สัจจาวาณิชย์ ตระกูล อร่ามรักษ์ และวุฒิกรณ์ มาลี (2549).คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง. รายงานวิจัย. ตุลาคม พ.ศ. 2549

ชูโชค ศิวะคุณากร (2536). การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงด้วยการผสมเถ้าถ่านหิน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เจริญวุฒิ ปัญญานุสรณ์กิจ, เรือโท 2546: การปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้ดินขาวสำหรับงานซ่อม ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ (2546). การพัฒนาเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วและเถ้าก้นเตาเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน. สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

กรรณิกา เตชะสกุลมาศ (2528). สมบัติทางเคมีของดินเหนียวและดินขาวบางตัวอย่าง . สาขาการสอนเคมี วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Cavaleri, L. Miraglia, N.and Papia M. (2003) Pumice Concrete for structural wall panels. Engineering Structures. 25(1) :115-125.

Chi J.M., Huang R., Yang C.C., and ChangJ.J., 2003, “Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete”,*Cement & Concrete Composites*; Vol. 25, pp.197–205.

Latona, M, C., Neufeld, R., D., Vellejo, L., E., Hu, W., and Kelly, C., 1996, "Environmental impacts of autoclaved cellular concrete", *Proceedings of the 1996 ASCE National Convention*: New York, USA, pp. 57-69.

Keeswadkhon, P. and Homkrajay, S., 1996, *Properties of light weight concrete*, Bachelor's Project, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok.

Rojprasitporn, K., Sudkla, S., and Borirakarawin, A., 2003, "*Properties of light weight concrete mixed with micro-fibre*, Bachelor's Project, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. (In Thai)

Jichiyaphum, K., Sinsiri, T., and Chindaprasert, P., 2009, "Cellular-light weight concrete containing natural pozzolan", *5th Annual Concrete Conference*, Nakhon Ratchasima, MAT 129-135. (In Thai)

Gunduz, L. and Ugur, I. (2005). The Effect of Different Fine and Course Pumice Aggregate/Cement Ratio on the structural Concrete Properties Without Using Any Admixtures. Cement and Concrete Research. 35(9) :1859-1864

Gunduz, L. (2008). The effects of pumice aggregate/cement ratios on the low–strength Concrete Properties. Construction and Building Materials. 22(5) : 721-728.

Hossain, K.M.A. (2003). Blended cement using volcanic ash and pumice. Cement and Concrete Research 33(10) :1601-1605.

Hossain, K.M.A. (2004). Properties of Volcanic Based Cement and Lightweight Concrete Cement and Concrete Research. 34(2) : 283-291

Hossain, K.M.A. (2008). Potential Use of Volcanic as a Construction Material. Journal of Materials in Civil Engineering. 16(6) : 573 – 577.

Lo, T.Y. Cui , H.Z. (2004). Influence of aggregate pre – wetting and fly ash on Mechanical properties of lightweight concrete. Waste Management 24(4)

Manuel, M., 1990, "Autoclaved cellular concrete for residential construction", *Concrete International*, Vol. 12, No. 9, pp. 41-44

Sahin R., Demirboga R, Uysal H. and Gul R., (2003). The effects of different cement dosages. Slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of Concrete. Cement and Concrete Research. 33(8) : 1245 – 1249.

Sahin S., Orung I., Okuroglu M. and Karadutlu Y., (2008). Properties of prefabricated building Materials produced from ground pumice aggregate and binders. Construction and Building Materials. 22(5) : 989 – 992.

Sari, D. and Pasamehmetoglu, A.G. 2005. The Effects of Gradation and Admixture on the pumice Lightweight Aggregate Concrete. Cement and Concrete Research. 35(5) : 936 -942

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและกายภาพ

ตารางที่ ก-1 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 14 วัน

ส่วนผสม	W/B	ø (cm)	สูง (cm)	Volume (cm^3)	น้ำหนัก (Kg)		compression (KN)	
					น้ำหนัก	เฉลี่ย	compression	เฉลี่ย
M/Control	0.55	10	20	78.539	2.65	2.63	28.80	26.00
		10	20	78.539	2.65		25.70	
		10	20	78.539	2.60		23.50	
M/PFA20	0.55	10	20	78.539	2.55	2.45	71.70	59.93
		10	20	78.539	2.40		64.10	
		10	20	78.539	2.40		44.00	
M/PFA35	0.55	10	20	78.539	2.60	2.68	89.40	108.37
		10	20	78.539	2.70		103.4	
		10	20	78.539	2.75		132.3	
M/PFA50	0.55	10	20	78.539	2.80	2.75	134.1	126.53
		10	20	78.539	2.75		131.9	
		10	20	78.539	2.70		113.6	
M/MK10	0.55	10	20	78.539	2.50	2.62	42.1	72.97
		10	20	78.539	2.65		95.4	
		10	20	78.539	2.70		81.4	
M/MK15	0.55	10	20	78.539	2.65	2.70	103.5	104.87
		10	20	78.539	2.70		127	
		10	20	78.539	2.75		84.1	
M/MK20	0.55	10	20	78.539	2.75	2.67	93.8	90.10
		10	20	78.539	2.70		91.2	
		10	20	78.539	2.55		85.3	

ตารางที่ ก-2 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	W/B	ø (cm)	สูง (cm)	Volume (cm^3)	น้ำหนัก (Kg)		compression (KN)	
					น้ำหนัก	เฉลี่ย	compression	เฉลี่ย
M/Control	0.55	10	20	78.539	2.70	2.68	106.00	100.47
		10	20	78.539	2.75		111.20	
		10	20	78.539	2.60		84.20	
M/PFA20	0.55	10	20	78.539	2.45	2.68	68.00	73.73
		10	20	78.539	2.95		69.20	
		10	20	78.539	2.65		84.00	
M/PFA35	0.55	10	20	78.539	2.65	2.72	107.80	103.53
		10	20	78.539	2.75		110	
		10	20	78.539	2.75		92.8	
M/PFA50	0.55	10	20	78.539	2.70	2.68	133.3	129.37
		10	20	78.539	2.70		147.6	
		10	20	78.539	2.65		107.2	
M/MK10	0.55	10	20	78.539	2.40	2.50	44.3	69.27
		10	20	78.539	2.45		71.5	
		10	20	78.539	2.65		92	
M/MK15	0.55	10	20	78.539	2.60	2.60	133	126.90
		10	20	78.539	2.60		133.6	
		10	20	78.539	2.60		114.1	
M/MK20	0.55	10	20	78.539	2.55	2.60	78.9	103.90
		10	20	78.539	2.60		115.7	
		10	20	78.539	2.65		117.1	

ตารางที่ ก-3 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังดึงที่อายุ 14 วัน

ส่วนผสม	W/B	ø (cm)	สูง (cm)	Volume (cm^3)	น้ำหนัก (Kg)		compression (KN)	
					น้ำหนัก	เฉลี่ย	compression	เฉลี่ย
M/Control	0.55	10	20	78.54	2.60	2.53	43.00	50.47
		10	20	78.54	2.45		46.20	
		10	20	78.54	2.55		62.20	
M/PFA20	0.55	10	20	78.54	2.50	3.72	93.80	65.27
		10	20	78.54	6.15		53.10	
		10	20	78.54	2.50		48.92	
M/PFA35	0.55	10	20	78.54	2.65	2.62	68.10	59.80
		10	20	78.54	2.65		63.5	
		10	20	78.54	2.55		47.8	
M/PFA50	0.55	10	20	78.54	2.80	2.82	58	57.40
		10	20	78.54	2.80		57.5	
		10	20	78.54	2.85		56.7	
M/MK10	0.55	10	20	78.54	2.60	2.65	35.2	42.07
		10	20	78.54	2.60		33.3	
		10	20	78.54	2.75		57.7	
M/MK15	0.55	10	20	78.54	2.70	2.67	58.1	58.87
		10	20	78.54	2.65		64.2	
		10	20	78.54	2.65		54.3	
M/MK20	0.55	10	20	78.54	2.55	2.62	59	58.47
		10	20	78.54	2.60		60.4	
		10	20	78.54	2.70		56	

ตารางที่ ก-4 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังดึงที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	W/B	ø (cm)	สูง (cm)	Volume (cm^3)	น้ำหนัก (Kg)		compression (KN)	
					น้ำหนัก	เฉลี่ย	compression	เฉลี่ย
M/Control	0.55	10	20	78.54	2.65	2.63	70.80	62.58
		10	20	78.54	2.60		56.60	
		10	20	78.54	2.63		60.33	
M/PFA20	0.55	10	20	78.54	2.95	1.89	71.30	61.01
		10	20	78.54	0.00		55.00	
		10	20	78.54	2.73		56.73	
M/PFA35	0.55	10	20	78.54	2.75	2.76	67.10	68.64
		10	20	78.54	2.80		71.60	
		10	20	78.54	2.72		67.23	
M/PFA50	0.55	10	20	78.54	2.70	2.68	59.30	60.83
		10	20	78.54	2.65		63.80	
		10	20	78.54	2.70		59.40	
M/MK10	0.55	10	20	78.54	2.50	2.54	64.00	68.20
		10	20	78.54	2.60		76.10	
		10	20	78.54	2.52		64.50	
M/MK15	0.55	10	20	78.54	2.60	2.67	50.00	59.16
		10	20	78.54	2.75		70.80	
		10	20	78.54	2.65		56.67	
M/MK20	0.55	10	20	78.54	2.55	2.56	46.20	51.90
		10	20	78.54	2.55		56.80	
		10	20	78.54	2.58		52.70	

ตารางที่ ก-5 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 14 วัน

ส่วนผสม	W/B	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	Volume (cm^3)	น้ำหนัก (Kg)		compression (KN)	
						น้ำหนัก	เฉลี่ย	compression	เฉลี่ย
M/Control	0.55	10	35	10	3500	6.15	6.15	12.58	12.60
		10	35	10	3500	6.15		11.80	
		10	35	10	3500	6.15		13.43	
M/PFA20	0.55	10	35	10	3500	6.25	6.28	10.68	11.50
		10	35	10	3500	6.25		11.17	
		10	35	10	3500	6.35		12.65	
M/PFA35	0.55	10	35	10	3500	6.25	6.07	10.03	10.13
		10	35	10	3500	5.90		10.00	
		10	35	10	3500	6.05		10.36	
M/PFA50	0.55	10	35	10	3500	6.60	6.30	12.36	12.37
		10	35	10	3500	6.10		12.09	
		10	35	10	3500	6.20		12.67	
M/MK10	0.55	10	35	10	3500	6.25	6.28	14.69	13.17
		10	35	10	3500	6.20		12.60	
		10	35	10	3500	6.40		12.21	
M/MK15	0.55	10	35	10	3500	6.30	6.18	12.06	11.38
		10	35	10	3500	6.10		11.60	
		10	35	10	3500	6.15		10.47	
M/MK20	0.55	10	35	10	3500	6.00	6.25	11.36	12.04
		10	35	10	3500	6.55		14.40	
		10	35	10	3500	6.20		10.36	

ตารางที่ ก-6 ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	W/B	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	Volume (cm^3)	น้ำหนัก (Kg)		compression (KN)	
						น้ำหนัก	เฉลี่ย	compression	เฉลี่ย
M/Control	0.55	10	35	10	3500	6.25	6.25	10.86	10.88
		10	35	10	3500	6.40		10.18	
		10	35	10	3500	6.10		11.59	
M/PFA20	0.55	10	35	10	3500	6.20	6.35	11.68	12.58
		10	35	10	3500	6.40		12.22	
		10	35	10	3500	6.45		13.84	
M/PFA35	0.55	10	35	10	3500	6.35	6.18	9.28	9.38
		10	35	10	3500	6.00		9.26	
		10	35	10	3500	6.20		9.59	
M/PFA50	0.55	10	35	10	3500	6.85	6.47	14.98	15.00
		10	35	10	3500	6.25		14.65	
		10	35	10	3500	6.30		15.36	
M/MK10	0.55	10	35	10	3500	6.35	6.38	21.49	19.26
		10	35	10	3500	6.15		18.43	
		10	35	10	3500	6.65		17.87	
M/MK15	0.55	10	35	10	3500	6.25	6.25	11.49	10.84
		10	35	10	3500	6.20		11.05	
		10	35	10	3500	6.30		9.98	
M/MK20	0.55	10	35	10	3500	6.25	6.42	15.97	16.92
		10	35	10	3500	6.70		20.24	
		10	35	10	3500	6.30		14.56	

ตารางที่ ก-7 ตารางบันทึกผลการทดสอบพลังงานกระแทกที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	W/B	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	Area (cm^3)	น้ำหนัก (Kg)		compression (joul)	
						น้ำหนัก	เฉลี่ย	compression	เฉลี่ย
M/Control	0.55	4	4	16	256	0.40	0.43	102.00	83.33
		4	4	16	256	0.45		70.00	
		4	4	16	256	0.45		78.00	
M/PFA20	0.55	4	4	16	256	0.45	0.47	74.00	82.00
		4	4	16	256	0.50		59.00	
		4	4	16	256	0.45		113.00	
M/PFA35	0.55	4	4	16	256	0.45	0.43	131.00	91.00
		4	4	16	256	0.45		62	
		4	4	16	256	0.40		80	
M/PFA50	0.55	4	4	16	256	0.45	0.45	29	60.00
		4	4	16	256	0.45		47	
		4	4	16	256	0.45		104	
M/MK10	0.55	4	4	16	256	0.50	0.48	79	66.33
		4	4	16	256	0.50		85	
		4	4	16	256	0.45		35	
M/MK15	0.55	4	4	16	256	0.45	0.45	46	50.33
		4	4	16	256	0.45		30	
		4	4	16	256	0.45		75	
M/MK20	0.55	4	4	16	256	0.40	0.38	60	60.67
		4	4	16	256	0.35		61	
		4	4	16	256	0.40		61	

ภาคผนวก ข

รูปภาพวิธีการทดสอบ

ภาพที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

ภาพที่ 2 แบบหล่อคอนกรีต

ภาพที่ 3 ตัวอย่างใช้สำหรับทดสอบ

รูปภาพที่ 4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก