



การรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมปอซโซลานโดยระบบสามประสาน
Impact Strength of Pozzolans Materials Concrete by Ternary
Blends System

จักรพันธ์ แสงสุวรรณ
ปรัชญา ยอดดำรงค์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมปอซโซลานโดยระบบสามประสาน
Impact Strength of Pozzolans Materials Concrete by Ternary
Blends System

คณะผู้วิจัย

สังกัด

จักรพันธ์ แสงสุวรรณ
ปรัชญา ยอดดำรงค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุปอซโซลานโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและดินขาวซึ่งมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและกายภาพของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ทางด้านกำลังอัด กำลังดัด และกำลังรับกระแทกของคอนกรีตโดยใช้เถ้าลอย (fly ash) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร้อยละ 15, 30 และ 45 ตามลำดับ และดินขาว (Meta-kaolin) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ากำลังแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน $w/b = 0.40$ ให้ค่าสูงกว่า $w/b = 0.45$ ทุกสัดส่วนผสม และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 382 ksc ซึ่งให้ค่ามากกว่า การแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่ร้อยละ 10 (375 ksc), 15 (362 ksc) และ 20 (354 ksc) ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัด ส่วนผสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ 41 ksc มากกว่าคอนกรีตควบคุมและทุกๆส่วนผสมอื่น ในการทดสอบกำลังรับแรงกระแทกที่อายุ 28 วัน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังรับแรงกระแทกสูงสุดที่ 11 จูลน์ ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 30 ให้ค่า 110 จูลน์ และมากกว่าการแทนที่ด้วยดินขาวร้อยละ 15 (100 จูลน์) และ 20 (95 จูลน์) สรุปได้ว่าปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดแรงดัดและแรงกระแทกมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยจะทำให้กำลังรับแรงอัดแรงดัดและแรงกระแทก มีค่าเพิ่มขึ้น



Abstract

This research study to the effect of pozzolanic materials by replacement cement by fly ash and Meta kaolin, which affect the mechanical and physical properties of concrete. According to Standard test such as Compressive strength flexural strength and impact strength. The replacement cement by fly ash was 15%, 30% and 45%, respectively, and replacement cement by meta-kaolin was 10%, 15% and 20%, respectively. The results showed that the compressive strength of concrete at 28 days. When considered ratio $w/b = 0.40$ was higher than $w/b = 0.45$ all ingredient. The replacement cement by fly ash was the most effective. 10% (375 ksc), 15% (362 ksc) and 20% (354 ksc) respectively. The replacement cement by meta-kaolin gave the highest flexural strength of 41 ksc higher than control mixed concrete and all other ingredient. At the age of 28 days, The replacement cement by meta-kaolin was 10 percent result to the highest impact strength was 11 joule, which was close to that of fly ash by 30 percent give value was 110 joules and more than replacement cement by meta-kaolin was 15% (100 joule) and 20% (95 joule). It can be concluded that the increase in meta-kaolin content result to compressive strength will reduce, flexural strength and impact strength. As the amount of fly ash increased, the compressive strength increased. , flexural strength and impact strength Increased value.



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่ริเริ่มและนำเสนอแนวทางการนำวัสดุพอลิโพรพิลีนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งและสังเคราะห์นำมาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติสามารถนำมาพัฒนาใช้ในงานคอนกรีต เพื่อลดพลังงานและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตซีเมนต์ ทั้งยังเป็นต้นแบบของงานวิจัยและพัฒนาให้บรรลุไปได้ด้วยดี และต้องขอขอบคุณคณะผู้ร่วมวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยในครั้งนี้ให้ผ่านไปได้ด้วยดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่สละเวลาในการประสานงานและติดต่อกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ 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	ณ
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ของการศึกษา	2
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัสดุแก้วลอย	5
2.2 วัสดุดินขาว	11
บทที่ 3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	20
3.2 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ	20
3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตและสัญลักษณ์	22
3.4 วิธีการทดสอบและปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4. วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ	
4.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)	28
4.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)	33
4.3 การทดสอบกำลังรับแรงกระแทก (Impact Strength)	38
บทที่ 5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของปอชโซลานคอนกรีต	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
บรรณานุกรม	42
ภาคผนวก ก.	44
ภาคผนวก ข.	56

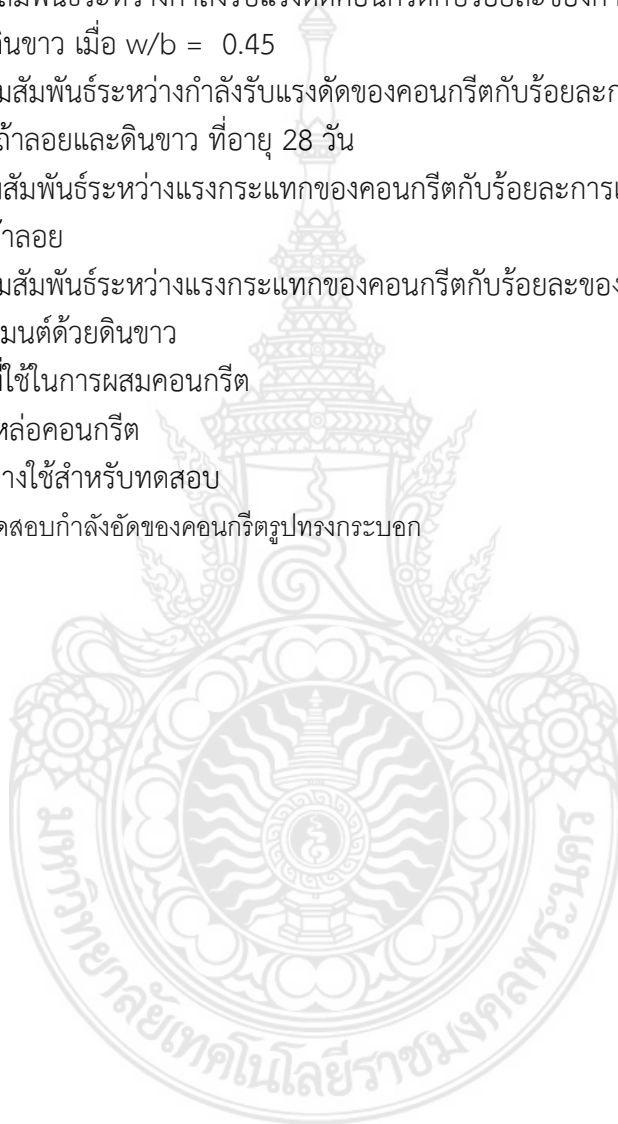


สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แก้วลอยที่ได้จากถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า	4
ภาพที่ 2.2 (ก) ลักษณะของแก้วลอย (ข) ภาพถ่ายแบบส่องกราดของรูปร่างของแก้วลอย	6
ภาพที่ 2.3 การรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมแก้วลอย	12
ภาพที่ 2.4 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod	14
ภาพที่ 2.5 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะ และแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก	15
ภาพที่ 2.6 การวัด % การแตกหักแบบเหนียว (ดูภาพที่ 2.5 ประกอบ)	15
ภาพที่ 2.7 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact Transition Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ	16
ภาพที่ 2.8 (ก) ลักษณะของดินขาว (ข) ภาพถ่ายแบบส่องกราดของรูปร่างของดินขาว	16
ภาพที่ 3.1 วัสดุประสานประกอบด้วย ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ แก้วลอย และดินขาว	21
ภาพที่ 3.2 รูปร่างอนุภาคแก้วลอยและองค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยวิเคราะห์ด้วย XRF	21
ภาพที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาววิเคราะห์ด้วย XRF	22
ภาพที่ 3.4 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานของคอนกรีต ASTM C 39	24
ภาพที่ 3.5 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตตามมาตรฐานASTMC78-94	25
ภาพที่ 3.6 แสดงการทดสอบแรงกระแทก (a) แสดงตัวอย่างที่ใช้ Charpy and Izod test	26
ภาพที่ 3.7 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดกลืนพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกของวัสดุ	26
ภาพที่ 3.8 กราฟแสดงผลของปริมาณของคาร์บอนที่มีต่อ impact energy และอุณหภูมิสำหรับเหล็กที่ทำให้ร้อนขึ้น	27
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยแก้วลอย เมื่อ $w/b = 0.40$	29
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยแก้วลอย เมื่อ $w/b = 0.45$	29
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว เมื่อ $w/b = 0.40$	31
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว เมื่อ $w/b = 0.45$	31
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยแก้วลอยและดินขาว ที่อายุ 28 วัน	32
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยแก้วลอย เมื่อ $w/b = 0.40$	34
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยแก้วลอย เมื่อ $w/b = 0.45$	34

สารบัญภาพ

ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว เมื่อ $w/b = 0.40$	36
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว เมื่อ $w/b = 0.45$	36
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอยและดินขาว ที่อายุ 28 วัน	37
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกของคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอย	39
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว	39
ภาพที่ ข-1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	57
ภาพที่ ข-2 แบบหล่อคอนกรีต	57
ภาพที่ ข-3 ตัวอย่างใช้สำหรับทดสอบ	58
ภาพที่ ข-4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงระบอก	59



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณ องค์ประกอบเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก(ระหว่างปี พ.ศ.2533-2542)	5
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a	7
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ Type I, PFA และ MK	21
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม (สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)	23
ตารางที่ 3.3 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.60), (น้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)	23
ตารางที่ 3.4 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.50), (น้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)	24
ตารางที่ 3.5 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.40), (น้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)	24
ตารางที่ 4.1 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย	28
ตารางที่ 4.2 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว	30
ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาว ที่อายุ 28 วัน	32
ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย	33
ตารางที่ 4.5 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว	35
ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาวอายุ 28 วัน	37
ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาว	38
ตารางที่ ก-1 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.40	45
ตารางที่ ก-2 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.40	45
ตารางที่ ก-3 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.40	45
ตารางที่ ก-4 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.40	46
ตารางที่ ก-5 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.45	46
ตารางที่ ก-6 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.45	46
ตารางที่ ก-7 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.45	47
ตารางที่ ก-8 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.45	47
ตารางที่ ก-9 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.40	47
ตารางที่ ก-10 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.40	48
ตารางที่ ก-11 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.40	48
ตารางที่ ก-12 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตดินขาว 20% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.40	48
ตารางที่ ก-13 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.45	49
ตารางที่ ก-14 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.45	49
ตารางที่ ก-15 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.45	49
ตารางที่ ก-16 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตดินขาว 20% ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.45	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันงานคอนกรีตสมัยใหม่ที่มีกำลังและความทนทานสูงมีบทบาทในงานคอนกรีตมากขึ้นการใช้สารผสมเพิ่มชนิดปอซโซลานเช่น เถ้าลอยและดินขาว ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นและมีโครงสร้างภายในที่แน่นขึ้นโดยสารผสมเพิ่มทั้งสองชนิดที่กล่าวมาเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่นโรงไฟฟ้าแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณวันละหลายหมื่นตันในการผลิตไฟฟ้าซึ่งทำให้ได้เถ้าลอยลิกไนต์ที่มีคุณภาพที่ค่อนข้างสม่ำเสมอซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง (byproduct) ดังนั้นปริมาณและราคาของสารผสมเพิ่มดังกล่าวจึงขึ้นกับกลไกการผลิตทางอุตสาหกรรม ดินขาว (Metakaolin) เป็นวัสดุปอซโซลานอีกชนิดหนึ่ง ได้จากการนำดินขาวดิบ (Kaolin) ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติเผาที่อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสม เมื่อนำมาผสมคอนกรีตจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเช่นเดียวกับเถ้าลอย ในประเทศไทยมีแหล่งดินขาวธรรมชาติหลายแหล่ง แต่การใช้งานส่วนใหญ่มักจะอยู่ในอุตสาหกรรมเซรามิก ข้อมูลในการศึกษาเกี่ยวกับการนำดินขาวมาใช้ในงานคอนกรีตยังมีอยู่น้อยซึ่งแตกต่างจากกรณีของเถ้าลอยที่ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายและนำมาใช้ในงานผสมคอนกรีตในงานก่อสร้างทั่วไป วัสดุปอซโซลานดินขาวและเถ้าลอยโดยทั่วไปมีคุณลักษณะที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆให้ดีขึ้นได้ จึงได้มีการนำเอาดินขาวและเถ้าลอยไปใช้ในงานหลายๆด้าน เช่นการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตกำลังสูง (High Strength concrete) การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตให้ความร้อนต่ำ (Low heat concrete) และงานคอนกรีตคุณภาพสูงที่สามารถไหลเข้าแบบเองโดยไม่ต้องอาศัยการสั่นสะเทือน (self-compacting concrete, SCC)

ดังนั้นจากคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีตที่มีดินขาวและเถ้าลอยเป็นส่วนผสมดังที่ได้กล่าวมานี้ ประกอบกับในขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นต้องใช้พลังงานที่สูงมากซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศและก่อให้เกิด ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) จึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ลดน้อยลง โดยให้ความสนใจในการศึกษาทำวิจัยโดยพยายามใช้วัสดุที่เหลือทิ้ง (by Product) จากภาคอุตสาหกรรมเกษตรกรรมและจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์

ในการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงการรับแรงกระแทกของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของดินขาวและเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านของกำลังรับแรงกระแทก กำลังอัด และกำลังดัด ของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในลักษณะวัสดุสามประสานเพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการกำลังสูงสำหรับรับแรงกระแทกและเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 หาความสัมพันธ์ของปริมาณดินขาวและเถ้าลอยที่ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ในกรณีของการทดสอบทางกายภาพ เช่นกำลังอัด กำลังดัดและการรับแรงกระแทกในระบบส่วนผสมสามประสาน

1.2.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด กำลังดัดและการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

1.2.3 หาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่มีความสัมพันธ์ของสัดส่วนผสมของเถ้าลอยกับกำลังอัด กำลังดัด และการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและดินขาวในระบบสามประสาน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงดัด กำลังอัด และการรับแรงกระแทกของปอซโซลานคอนกรีต

1.3.2 ออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยและดินขาว 3 แบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55, 0.40 และ 0.32 ตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 “Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete”

1.3.3 แทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนผสมทั้ง 3 แบบด้วยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 0,15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0,15, 30 และ 45โดยน้ำหนัก

1.3.4 ควบคุม (W/B) ให้เท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอยและดินขาวและควบคุมค่า Slump ให้อยู่ในช่วง 5-7 ซม.

1.3.5 การบ่มต่อเนื้อในห้องทดลอง ที่คอนกรีตอายุ 7, 14 และ 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบกำลังอัด ส่วนกำลังดัด และการรับแรงกระแทกจะทดสอบที่อายุ 7 วันโดยใช้ตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่างทุกสัดส่วนการผสมของแต่ละการทดลอง

1.4 ประโยชน์ของการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้เป็นประโยชน์และองค์ความรู้ในการวิจัยสำหรับการตัดสินใจที่จะนำเอาวัสดุประสานประเภทปอซโซลานมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต เพื่อที่เพิ่มประสิทธิภาพถึงพฤติกรรมการรับแรงกระแทก แรงดัด ลักษณะวิบัติ หน่วยแรงยึดเหนี่ยว ความคงทนและอายุการใช้งานเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตในด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันมากในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและเป็นที่ยอมรับกันดีอยู่แล้วว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานจำนวนมากซึ่งมีผลกระทบทำให้เกิดก๊าซที่มีผลต่อภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีความพยายามจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง และได้พยายามที่จะพัฒนา

สารซีเมนต์โดยใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักให้มีประสิทธิภาพที่สม่ำเสมอสำหรับนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยการนำวัสดุเหลือทิ้ง (by product) นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

หรือในอีกมุมหนึ่งสามารถช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีวัสดุปอซโซลานผสมในโครงสร้างคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้งานวิจัยยังสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่จำเป็นต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตตลอดจนการใช้เถ้าลอย (Fly ash) และดินขาว (Meta kaolin) ที่มีอยู่ในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์สูงสุด



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นที่ทราบกันดีว่าแล้ววาคอนกรีตมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งได้จากการใช้พลังงานในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 1400-1600 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สารประกอบหลักทางเคมีเช่น ซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานที่สูงมากซึ่ง จะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศมีผลทำให้เกิด ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นจึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยในปัจจุบันได้มีการทำวิจัยกันอย่างกว้างขวางโดยพยายามใช้วัสดุที่เหลือทิ้ง (by Product) จากภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรมและจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งวัสดุที่ใช้ผสมเป็นวัสดุปอซโซลานที่ไม่มีความสมบัติเป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้และที่ใช้กันมากได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ดินขาว (Metakaolin) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash)ซึ่งคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลานมีความสมบัติที่ดีขึ้น (Metha,1977)



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

2.1 วัสดุเถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหิน รูปที่ 2 โดยเถ้าลอยจะถูกดักจับเก็บไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทาดำหรือน้ำตาลมี ส่วนประกอบหลักเป็นอัยรูปของซิลิกาและอลูมินาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำได้สารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหินที่ใช้, ความละเอียดของถ่านหินที่บดก่อนเข้าเตาเผา, อุณหภูมิและความร้อนจากการเผา

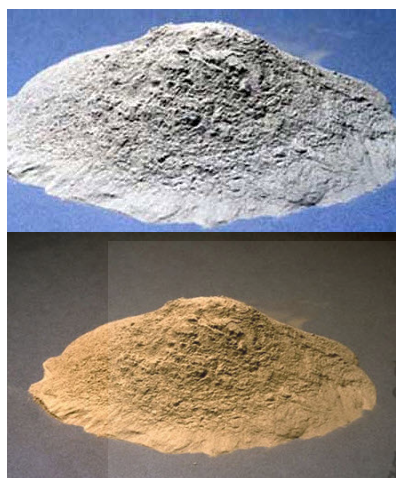
2.1.1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂), อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในช่วงประมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอยและขบวนการผลิตเมื่อเปรียบเทียบเถ้าลอยแม่เมาะกับเถ้าลอยของต่างประเทศความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนคือปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะจะอยู่ระหว่าง 9-17 % ในขณะที่เถ้าลอยส่วนใหญ่ในต่างประเทศจะมี CaO อยู่ระหว่าง 2-7 % เท่านั้นองค์ประกอบโดยเฉลี่ยทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะในรอบ 10ปีล่าสุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

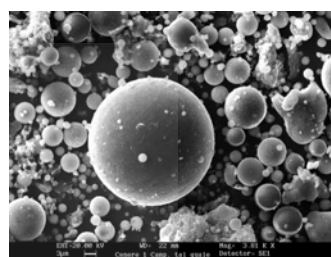
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณองค์ประกอบเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก(ระหว่างปี พ.ศ.2533-2542)

Chemical composition	Average Value in Percentages										ASTM-C618-94a requirement for Fly ash Class C
	2533	2534	2535	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	
SiO ₂	37.8	42.8	40.3	43.1	52.8	40.6	40.6	41.5	37.3	47.2	} Min. SUM = 50
Al ₂ O ₃	20.5	23.3	24.0	20.2	18.0	22.8	23.6	28.1	22.3	22.1	
Fe ₂ O ₃	14.2	14.0	15.0	13.2	8.5	12.8	13.0	12.3	14.4	9.1	
CaO	17.4	10.5	11.2	13.0	13.3	14.4	13.0	10.0	11.4	9.4	
SO ₃	3.9	3.9	3.1	2.6	2.8	2.8	2.4	2.0	2.5	1.7	Max. = 5.0
MgO	3.3	2.4	2.8	2.7	1.4	2.5	2.5	1.2	2.7	3.3	Max. = 5.0
Na ₂ O	0.9	0.8	1.0	1.3	0.9	0.7	1.2	0.6	1.1	1.3	
K ₂ O	2.1	2.3	2.6	2.4	2.0	2.4	3.0	3.3	2.7	2.5	
Loss on	0.8	0.7	0.5	0.6	0.3	0.9	0.7	0.8	0.1	0.1	Max. = 6.0

ที่มา: ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ 2543 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย น. 7-19. ใน เอกสารการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



(ก)



(ข)

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

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลม รูปที่ 3 บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม สีของเถ้าลอยส่วนมากมีสีน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลและสีเทาถึงดำขนาดของอนุภาคเถ้าลอยจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 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 ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวต้องมีอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับดังตารางที่ 2 ทั้งนี้การกำหนดดังกล่าวเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าในเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างเพียงพอและยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวด้วยและยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวในการเกิด Sulfate Attack ร้อยละของอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) กำหนดไว้ไม่เกิน 1.5% ทั้งนี้เพื่อป้องกันการแตกร้าวจากผลของปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาในมวลรวมกับสารอัลคาไลน์ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวดัชนีกำลังเป็นค่าที่บ่งบอกการ

เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานโดยเปรียบเทียบกำลังอัดเป็นร้อยละของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 7 และ 28 วันกับมอร์ตาร์ถ้ามีค่าสูงแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูง

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-94a

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O 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 ₂ O), max %	1.5	1.5

2.1.4 ปฏิกิริยาเคมีในคอนกรีตผสมเถ้าลอย

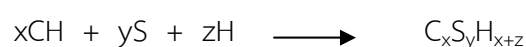
ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะเกิดปฏิกิริยาเคมี 2 ขั้นตอนด้วยกันโดยปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นก่อนแล้วจึงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำก็จะเริ่มขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยสารประกอบ C₃S และ C₂S ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้สารประกอบซิลิเกตไฮเดรต

(3CaO.2SiO₂.3H₂O : C₃S₂H₃) และซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂ : CH) ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



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

สารประกอบซิลิเกตไฮเดรตทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นรู้น มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานมีความเหนียว ก่อตัว แข็งตัว และยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้น โดยหลักๆแล้วจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาออกไซด์ (SiO₂ : S) ที่มีอยู่ในเถ้าลอยกับซิลิเกตไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นซิลิเกตไฮเดรตอีกดังนี้



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

เอกสิทธิ์และวิศว (2542) พบว่าปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย จะมีค่ามากกว่าในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาอันสืบเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย โดยซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย 15% จะมี CSH มากกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา 5% ที่อายุ 28 วันและ 10% ที่อายุ 56 วัน

แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง Helmuth (1987) พบว่าเมื่อคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุมากขึ้นช่องว่างใน CSH จะเล็กลง ความหนาของชั้นเถ้าลอยลดลงตามปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิด CSH มากขึ้น กำลังจึงมากขึ้น

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีความแตกต่างจากปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์คือ

1. เป็นปฏิกิริยาที่เกิดช้ากว่า (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดหรือพื้นที่ผิวของวัสดุปอซโซลาน) ทำให้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่ำกว่า และมีการพัฒนากำลังช้ากว่า
2. เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ Ca(OH)_2 ส่วนปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกิริยาที่ผลิต Ca(OH)_2 ดังนั้นการเกิด ปฏิกิริยาปอซโซลานต้องรอให้ปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นก่อน
3. ทำให้มีตัวเชื่อมประสานมากขึ้นซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น คุณสมบัติต้านกำลังอัด ความทนทาน การต้านทานการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

ได้มีการศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงสำหรับใช้ในงานโครงสร้างครั้งแรก โดย The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ในปลายทศวรรษ 1980s (Malhotra, 1986) คอนกรีตชนิดนี้มีส่วนผสมเถ้าลอยมากกว่าซีเมนต์โดยน้ำหนักและปกติจะผสมที่อัตราส่วน W/B ประมาณ 0.3 กำลังของคอนกรีตในระยะต้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และมีการพัฒนากำลังและโมดูลัสความยืดหยุ่นในระยะหลังมากขึ้น มีการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) และการล้า (creep) ต่ำและมความทนทานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ (Langley et al., 1989; Carrette et al., 1993; Bilodeau et al., 1994; Bisailon et al., 1994) เชื่อกันว่าในการผสมเถ้าลอยมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก เถ้าลอยจะมีส่วนสำคัญในการเชื่อมประสาน (Berry et al., 1994) เถ้าลอยเป็นที่รู้จักในฐานะวัสดุปอซโซลานมานานโดยตัวเถ้าลอยเองแล้วมีคุณสมบัติน้อยหรือไม่ มีคุณสมบัติทางการ เชื่อมประสาน (ASTM 618-94a, 1995) และไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตในงานโครงสร้างมักนิยมใช้แทนที่ซีเมนต์ในช่วง 15% ถึง 25% (ACI Committee 211, 1993; Berry et al., 1994) แต่เมื่อมีการใช้เถ้าลอยปริมาณที่สูงจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในการพัฒนากำลังและปฏิกิริยาไฮดรชันโดยทั่วไปปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างจะจำกัดประมาณ 20 ถึง 25% ของวัสดุประสาน (Zhang, 1995) มาตรฐานในหลายประเทศยังคงจำกัดปริมาณมากที่สุดของเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างประมาณ 20 ถึง 25% ซึ่งในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานอาจจะยังคงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยบางส่วนอาจยังคงอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะหลังการบ่มเป็นเวลานาน (Zhang, 1995)

Feldman et al. (1990) พบว่าในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง เถ้าลอยจะเริ่มทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในช่วง 3 ถึง 7 วัน แต่ยังคงมีปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และเถ้าลอยจำนวนมากที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลัง 91 วัน ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาอยู่ในรูปของ calcium silicate hydrate (C-S-H) และมีอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกา (c/s) ที่ต่ำ

Berry et al. (1990) ศึกษากลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในเพสต์ที่ใช้เถ้าลอยปริมาณสูงแทนที่ซีเมนต์ โดยทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านกำลังอัดของมอร์ต้า ทางรูปร่าง (morphology) โดยการใช้วิธี SEM ส่วนประกอบของส่วนของแข็ง (solid-phase) และระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการใช้วิธี XRD และการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิจาก (thermal analysis) และส่วนประกอบของ pore fluid โดยวิธี high-pressure extraction พบว่าในระบบเถ้าลอยปริมาณสูง (high-volume fly ash system) ทั้งปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีมีผลกระทบร่วมกันต่อความแน่น (density) และแรงยึดเหนี่ยวในเพสต์ ในช่วงต้นผลกระทบทางด้านกายภาพโดยการอุดตันช่องว่างและทางเคมีโดยมีผลต่อการเกิด ettringite หรือการเกิด sulphoaluminate เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนากำลัง ในระยะยาวปฏิกิริยาไฮเดรชันมีอิทธิพลจากการเกิด silico-aluminate binder ที่เกี่ยวพันจากปฏิกิริยากับเถ้าลอย Sivasundaram et al. (1989) ศึกษาการก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และการก่อตัวสุดท้าย (final setting time) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง โดยมี W/C หรือ W/B เดียวกันพบว่า การก่อตัวเริ่มต้นสามารถเปรียบเทียบกันได้กับคอนกรีตควบคุมคือ 7.5 ชั่วโมง ในขณะที่การก่อตัวสุดท้ายถูกหน่วงให้ช้ากว่าคอนกรีตควบคุมประมาณ 3 ชั่วโมง Sivasundaram et al. (1991) รายงานว่าการหน่วงระยะเวลาก่อตัวสามารถเกิดขึ้นได้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงที่ผสมจากเถ้าลอยบางชนิด และการหน่วงระยะเวลาก่อตัวยังสัมพันธ์กับความเข้ากันได้ (compatibility) ระหว่างวัสดุประสานและ superplasticizer และเมื่อใช้ superplasticizer ในปริมาณสูงอาจทำให้เกิดการหน่วงระยะเวลาก่อตัวได้

Carette et al. (1995) ศึกษาโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงเปรียบเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติที่มีกำลังเท่ากัน พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงของอนุภาคเถ้าลอยทำให้เพสต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มากกว่าเพสต์ของคอนกรีตที่ไม่มีการผสมเถ้าลอยและอนุภาคของเถ้าลอยยังปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในเพสต์ให้ดีขึ้นโดยอนุภาคของเถ้าลอยทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก (microaggregate) ที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่า matrix ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Zhang, 1995)

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

Atis (2001) ศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงโดยวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตภายใต้สภาวะการบ่มแบบ adiabatic พบว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในเถ้าลอยคอนกรีตขึ้นกับระดับการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอยและปริมาณ Superplasticizer ที่ใช้เพื่อรักษาความสามารถในการทำงานได้ การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ทำให้ลดระดับอุณหภูมิสูงสุดและเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่ของเถ้าลอยยังเป็นการลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและ Superplasticizer สามารถชะลอระยะ

เวลาที่จะเกิดอุณหภูมิสูงสุดโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมเหมือนกันแสดงอุณหภูมิสูงสุดที่เท่ากันโดยไม่ขึ้นกับการใส่ superplasticizer

Lane and Best (1978) ศึกษาผลกระทบของการใช้ Superplasticizer ร่วมกับเถ้าลอยในคอนกรีต และได้สรุปว่า superplasticizer มีความเข้ากันได้กับเถ้าลอย โดยสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่เกิดผลเสียในคอนกรีต โดยเปอร์เซ็นต์การลดน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าความยุบตัวเท่ากันมีค่าไม่เกิน 15% ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการลดน้ำมากกว่าสารลดน้ำมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้เปอร์เซ็นต์การลดน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีความชื้นเหลวเท่ากันเนื่องจากในความชื้นเหลวเท่ากันคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีน้ำส่วนเกินที่น้อยกว่าดังนั้นการเติมสารลดน้ำเพื่อนำน้ำส่วนเกินนี้มาใช้จึงมีผลกระทบที่น้อยกว่า

ประจิต (2526) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับคอนกรีต และศึกษากำลังรับแรงอัดโดยใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 0 ถึง 50% อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 ตามลำดับจากการทดลองพบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ 29% ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 45 วัน ตามลำดับโดยคอนกรีตยังให้กำลังเท่าเดิม

ปริญญาและอินทรชัย (2528) พบว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลามากขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและเสนอปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 0 ถึง 40% ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ได้มีการศึกษาการใช้เถ้าลอยแม่เมาะเพื่อปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และมีรายงานว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น แต่มีผลในการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

2.1.5 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ที่อายุแรกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดขึ้นน้อยกำลังอัดจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นส่วนใหญ่การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณซีเมนต์ลดลงปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นน้อยลง กำลังอัดจึงน้อยลงตามปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น Babu (1994) พบว่าสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทุกๆค่าที่อายุ 7 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีค่ากำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามการผสมเถ้าลอย 15% จะไม่มีผลในการลดกำลังลงมากนักซึ่งอาจเนื่องมาจากว่าเถ้าลอยสามารถอุดช่องว่างในคอนกรีตได้ดี ซึ่งกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในช่วงแรกๆ สามารถประเมินได้จากปริมาณของซีเมนต์เพียงอย่างเดียวโดยจะต้องมีการปรับค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เนื่องจากการที่น้ำทำให้เถ้าลอยเปียกด้วย เมื่อคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีอายุมากขึ้นการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมนั้นเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็น CSH เพิ่มขึ้นอีกทำให้กำลังอัดเพิ่มมากกว่าคอนกรีตธรรมดาระยะเวลากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยต้องรอ 1 ถึง 3 เดือน (Mokhtarzaden and French, 2000) นอกจากนี้ Helmuth (1987) พบว่าการผสมเถ้าลอยจนถึง 20% จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุมากกว่า 3-6 เดือนมีค่า

มากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย 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) นอกจากนี้ ประจิด (2526) พบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ 29% สำหรับคอนกรีตอายุ 28 และ 45 วันตามลำดับ โดยที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังเท่ากับคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย

2.1.6 กำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

กำลังดัดของคอนกรีตนั้นเป็นกำลังดึงชนิดหนึ่ง ซึ่งกำลังดึงของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตมากถึงแม้ว่ากำลังดึงของคอนกรีตจะไม่ค่อยพิจารณาในการออกแบบ (เนื่องจากการสมมติให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้) แต่ก็มีความสำคัญเพราะการแตกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้นได้ง่ายจากแรงดึง กำลังดึงของคอนกรีตโดยทั่วไปแบ่งตามการทดสอบได้ 3 ชนิดดังนี้

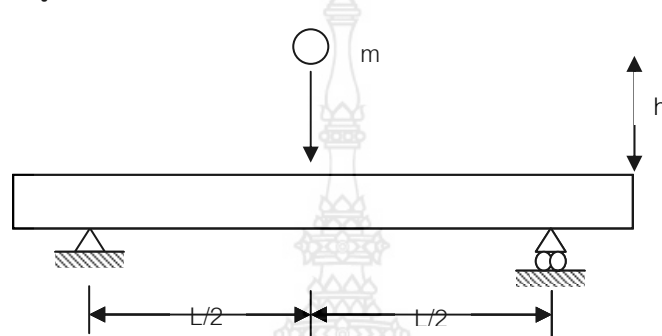
1. กำลังดึงโดยตรง (Uniaxial tensile strength) เป็นการทดสอบโดยให้แรงดึงโดยตรงกับชิ้นตัว อย่างคอนกรีต
2. กำลังดึงบนระนาบแตกร้าว (Splitting tensile strength) การทดสอบนี้ใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกวงกว้างให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอนแล้วทดสอบโดยการให้แรงอัด
3. กำลังดัด (Flexural strength) เป็นการทดสอบคานคอนกรีตซึ่งจะหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตได้ในรูปของโมเม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

วิธีการทดสอบทั้งสามนี้ให้ค่ากำลังที่ต่างกัน โดยกำลังดัดให้ค่าสูงสุด และกำลังดึงโดยตรงให้ค่าต่ำสุดเนื่องจากกำลังดัดและกำลังดึงบนระนาบแตกร้าวจะเกี่ยวข้องกับ การกระจายของหน่วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งไม่ใช่กำลังดึงที่แท้จริง 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

2.1.7 การรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

กำลังรับแรงกระแทกจะมีความสำคัญมากเมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำที่มีความเร็ว เช่น การตอกเสาเข็ม หรือการกระแทกเนื่องจากมวลวัตถุที่มีความเร็ว กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตโดยทั่วไปจะพิจารณาจากความสามารถในการทนต่อแรงกระแทก หรือจำนวนครั้งของการกระแทก หรือการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทก



ภาพที่ 2.3 การรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

พลังงานความเครียด (Strain energy, U)

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

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับการแ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของคาน

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

แทน (2) ใน (1) จะได้

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

จากพลังงานความเครียดเท่ากับงานที่ทำโดยวัตถุมวล m จะได้

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

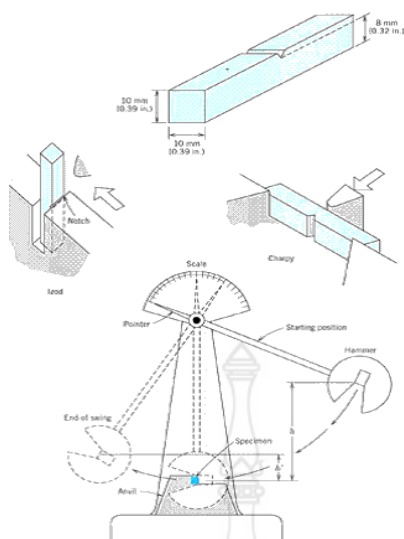
แก้สมการ (4) จะได้ y จากนั้นนำค่า y แทนใน (2) จะได้แรงสถิตย์ (p) เทียบเท่าแรงกระแทก ดังนั้นหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากแรงกระแทก (σ) หาได้จาก

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

เมื่อ	m	คือน้ำหนักของวัตถุที่ปล่อยที่ความสูง h
	h	คือระยะที่ทำการปล่อยวัตถุ
	L	คือระยะระหว่างจุดรองรับ
	E	คือโมดูลัสความยืดหยุ่นของคาน
	I	คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของพื้นที่หน้าตัดคาน
	P	คือแรงสถิตเทียบเท่าแรงกระทำ
	y	คือการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเนื่องจากแรงสถิต
	M	คือโมเมนต์ดัดสูงสุด
	C	คือระยะจากแกนสะเทินถึงขอบของหน้าตัด

กำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราการกระทำของแรงโดยกำลังของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการกระทำของแรงสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าที่อัตราการกระทำของแรงเข้าความเครียดจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการคืบ (creep) เมื่อความเครียดถึงขีดจำกัดก็จะเกิดการวิบัติ แต่ที่อัตราการกระทำของแรงสูงจะได้รับผลจากการคืบน้อยลงกำลังจึงสูงกว่า ซึ่งผลของอัตราการกระทำของแรงจะมีผลต่อการดึงโดยตรงมากที่สุด มีผลต่อการดัดปานกลาง และมีผลต่อการอัดน้อยที่สุด (Suaris และ Shah, 1983) นอกจากนี้ Zielinski และ Reinhardt (1982) พบว่ากำลังรับแรงกระทำจะมีค่าสูงกว่ากำลังแบบสถิตเสมอ เนื่องจากคอนกรีตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานความเครียดได้ดีกว่า โดยในการทดสอบกำลังดึง (Splitting tensile strength) จะเห็นว่าการเพิ่มความเร็วในการกระทำของแรงต่อคอนกรีต กำลังรับแรงกระทำจะมีค่าสูงกว่ากำลังแบบสถิตย์ประมาณ 80% Harris และคณะ (2000) พบว่าอัตราส่วนกำลังดึงแบบพลศาสตร์ต่อกำลังดึงแบบสถิตย์ (Dynamic-static splitting tensile strength ratio) จะลดลงทีละน้อยเมื่อกำลังดึงมีค่าสูงขึ้น และอัตราส่วนนี้มีค่าตั้งแต่ 0.98 ถึง 1.73 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 ซึ่งผลการทดสอบจะมีความแปรปรวนมากขึ้นเมื่อกำลังดึงสูงขึ้น Green (1964) พบว่าการทดสอบกำลังอัดแบบแรงกระทำจะมีการแปรปรวนของข้อมูลมากกว่าการทดสอบกำลังอัดแบบสถิต เพราะขณะเกิดแรงกระทำจะมีการกระจายของหน่วยแรงไม่สม่ำเสมอในช่วงเวลาอันสั้น

กำลังรับแรงกระทำยังขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตด้วย โดยความต้านทานต่อแรงกระทำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของมอร์ตาร์และความแข็งของมวลรวมหยาบ การใช้เถ้าลอยจะมีผลกระทบความต้านทานต่อแรงกระทำทางอ้อมจากการมีผลต่อกำลังอัด (ACI 226, 1987) แต่ Welch และ Haisman (1969) พบว่ากำลังรับแรงกระทำมีความสัมพันธ์กับกำลังดึงของคอนกรีตมากกว่ากำลังรับแรงอัด ดังนั้นมวลรวมหยาบมีเหลี่ยมมุมและผิวขรุขระแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์จะสูงขึ้นทำให้สามารถรับแรงกระทำได้มาก

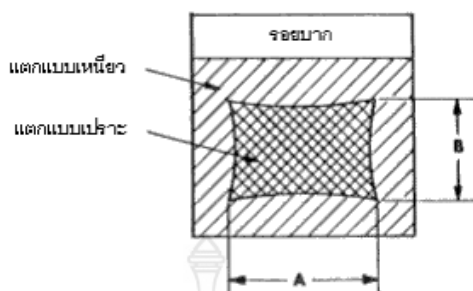


ภาพที่ 2.4 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod

วิธีการทดสอบของทั้ง 2 ชนิดนี้คล้ายกัน คือ จะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง (น้ำหนักและขนาดของตุ้มน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทำ การทดสอบระบุไว้) หลังงานที่กระแทกชิ้นทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของมันขณะกระแทก จุดกระแทกจะเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่ลูกตุ้มมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกตุ้มกระทบชิ้นทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่า Impact Energy นั้นเอง มีหน่วยเป็น ฟุต-ปอนด์ หรือ จูลส์

ข้อแตกต่างระหว่าง Charpy และ Izod ก็คือ การวางชิ้นงานทดสอบ โดย Charpy test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวระดับ และให้ลูกตุ้มตกกระแทกที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วน Izod Test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกตุ้มกระแทกกับด้านที่มีรอยบาก ชิ้นทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีรอยบากอยู่ตรงกลาง รอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปรูกลมๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้ อุดมภูมิมีผลต่อความเหนียวอย่างมาก วัสดุเหนียวอาจเปลี่ยนเป็นวัสดุเปราะได้เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ถ้าเรานำค่า Impact Energy มา plot กับอุณหภูมิเราจะพบว่าอุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าของ Impact Energy ลดลงอย่างรวดเร็วดังภาพที่ 9.3 ค่าอุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า Impact Transition Temperature (ITT) โดยค่า ITT นี้เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุจากวัสดุเหนียวมาเป็นวัสดุเปราะ คือ เปลี่ยนจากวัสดุเหนียวที่มีค่าพลังงานสูงมาเป็นวัสดุเปราะซึ่งมีพลังงานต่ำ ค่า Impact energy จะไม่นำมาใช้โดยตรงในการออกแบบ แต่มันมีประโยชน์ที่จะใช้เป็นแนวทางในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะพวกเหล็กที่มีค่า ITT อยู่ใกล้กับอุณหภูมิห้อง เราจะต้องระมัดระวัง ไม่ใช้งานวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่า ITT ของมัน

โดยทั่วไปเราจะกำหนดค่า ITT เป็นค่าเดียว (ไม่ใช่ช่วงอุณหภูมิดังที่แสดงในรูปที่ 9.4 โดยวิธีในการกำหนดค่า ITT มีอยู่หลายวิธี เช่น การตรวจสอบผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบแรงกระแทก หรือการกำหนดค่า ITT โดยใช้อุณหภูมิที่ผิวรอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมีสัดส่วนของพื้นที่ที่เกิดการแตกแบบเปราะ (Brittle Fracture) กับพื้นที่ที่แสดงการแตกแบบเหนียว (Ductile Fracture) เป็น 50:50 พอดี (ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Fracture Appearance Transition Temperature - FATT)

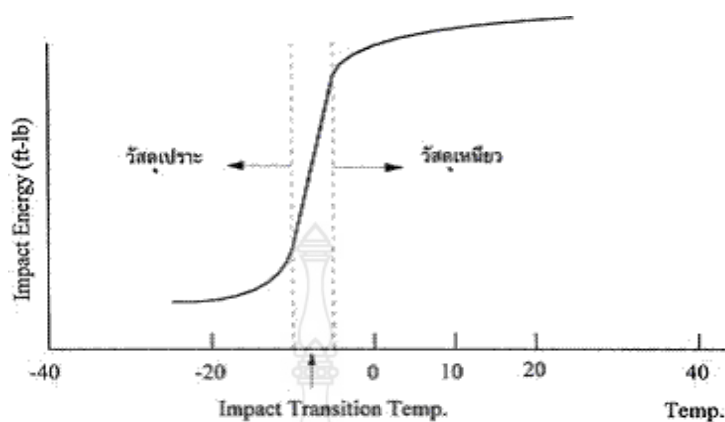


ภาพที่ 2.5 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะ และแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก

เส้น B, (มม.)	เส้น A, (มม.)																		
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1.5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	94	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4.0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4.5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6.0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6.5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

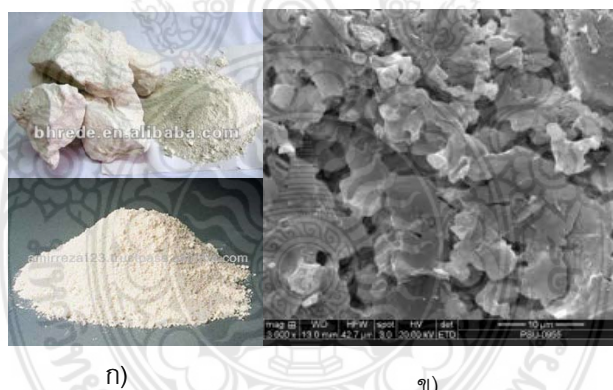
ภาพที่ 2.6 การวัด % การแตกหักแบบเหนียว (ดูภาพที่ 2.5 ประกอบ)

สำหรับวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ กำหนดค่า Impact Energy ค่าหนึ่งขึ้นมาเป็นเกณฑ์ โดยควรจะมีค่ามากกว่าพลังงานที่วัสดุจะได้รับในระหว่างการใช้งาน ถ้าวัสดุใดทดสอบแล้วมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ก็ถือว่าเป็นวัสดุเปราะซึ่งอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย จึงไม่ควรจะนำมาใช้งาน และกำหนดค่า ITT โดยให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบได้ค่า Impact Energy เท่ากับเกณฑ์ที่กำหนดพอดี (ITT ที่กำหนดโดยวิธีนี้เรียกว่า Ductility Transition Temperature) ค่าพลังงานแรงกระแทกที่ใช้เป็นเกณฑ์ คือ 20 J สำหรับการทดสอบ Charpy V-Notch (ชิ้นงานมีรอยบากรูปตัว V) ดังนั้นวัสดุที่จะนำไปใช้งานจึงควรมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด หรืออาจใช้ค่า Ductility Transition Temperature ในการกำหนดสถานะการใช้งาน คือ ควรจะใช้งานวัสดุในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า Ductility Transition Temperature



ภาพที่ 2.7 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact Transition Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ

เนื่องจากแต่ละมาตรฐานการทดสอบ จะใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดและลักษณะรอยบากที่ต่างกัน ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการทดสอบก็ต่างกัน ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ของการเลือกใช้ มาตรฐานต่างๆในการทดสอบ



ภาพที่ 2.8 (ก) ลักษณะของดินขาว (ข) ภาพถ่ายแบบส่องกราดของรูปร่างของดินขาว ที่มา : bhrede.en.alibaba.com

2.2 วัสดุดินขาว

ดินขาว ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) จัดเป็นวัสดุพอลิซิลิเกตที่ได้จากการนำเอาดินขาวดิบจากธรรมชาติ ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยวิธีการเผาในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งโดยทั่วไปมีผลึกเป็นลักษณะเป็นอัญรูป (Amorphous) ไม่มีรูปร่างที่แน่นอนมีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเหล็กของดินขาวประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักและรองลงมาเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีปริมาณที่แตกต่างกัน

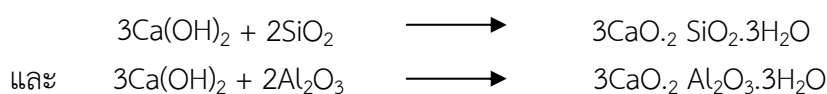
ตามแหล่งกำเนิดของดิน อนุภาคของดินขาวโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 1.5 ไมครอน (Balaguru,2001) ตามมาตรฐาน ASTM C168 ดินขาวเป็นสารปอซโซลาน Class N (Raw or Calcined Pozzolan) เมื่อผสมในคอนกรีตดินขาวจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต นอกจากนี้ดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น (Wild,1996) นอกจากนี้ดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้นปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (Wild, 1996 ; จีรวัดน์,2546)

สำหรับในประเทศไทยมีรายงานในการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบโดยอนุพงษ์ (2543) ศึกษาศักยภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวดิบในประเทศไทยจาก 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งปราจีนบุรี ระนอง และ ลำปาง โดยนำ ดินขาวดิบมาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และแปรผันเวลาในการเผา คือ 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จากการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาพบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินขาวดิบทั้ง 3 แหล่งคือ เผาด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง

นอกจากนี้ Hengsadeekul (1995) ได้ศึกษาดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดลำปาง โดยนำดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวดิบที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) มาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้างมีค่าสูงกว่าดินขาวดิบบดร้อยละ 6.4 และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผา คือ 800 องศาเซลเซียส (จีรวัดน์,2546)

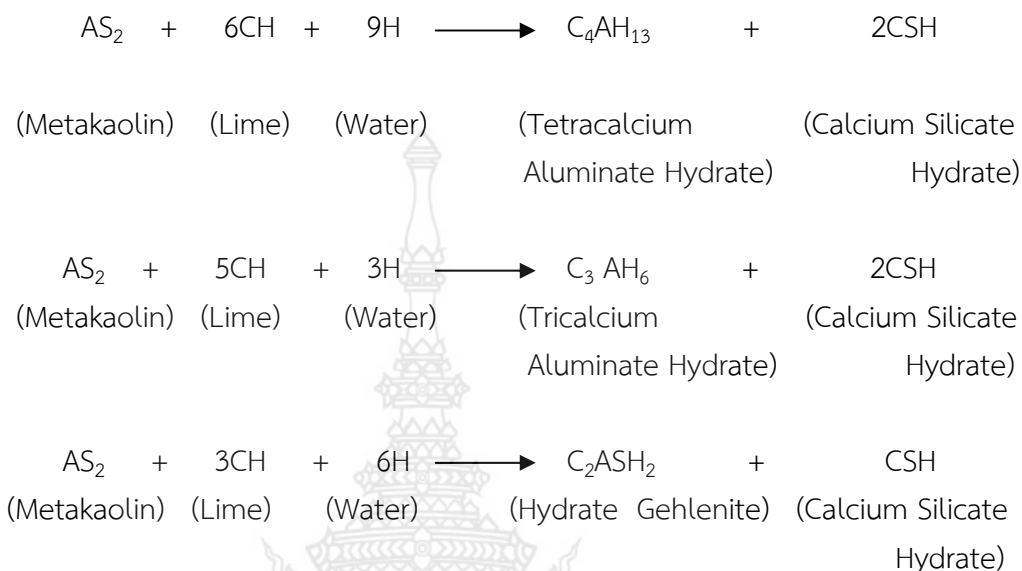
2.2.1 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 เกิดจากการทำปฏิกิริยาของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่เป็นสารประกอบหลักในดินขาวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้ (Mindess, 1981)



Murat (1983) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว โดยผสมดินขาวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส กับน้ำและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 20

องศาเซลเซียสพบว่าเกิดสารประกอบ C_4AH_{13} , C_3AH_6 , C_2ASH_2 และ CSH ซึ่งชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้นโดยสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้



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

มีรายงานการศึกษาระบุว่าปริมาณดินขาวที่ใช้เพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 15 - 20 โดยปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินขาว, พื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวและปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Oriol and Pera, 1995; Wild and Khatib, 1997; Kostuch et al., 1993) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และดินขาวในปริมาณร้อยละ 30 - 40 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมด ภายในเวลา 28 วัน (Oriol and Pera, 1995)

ผลการศึกษาของ Wild et al. (1997) พบว่าเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวเพิ่มขึ้นจาก 12,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม เป็น 15,000 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 ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากผสมดินขาวลงในคอนกรีตและผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นชัดเจนที่สุดในช่วง 7 - 14 วันแรก นอกจากนี้ดินขาวยังมีส่วนช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากการผสม

Curcio et al. (1998) ทำ การศึกษาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาว โดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าผสมซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) ในปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ที่เท่ากัน และพบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่ามอร์ต้าผสมซิลิกาฟุ้งโดยสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วง 28 วันแรก แต่ในระยะยาว (90 - 180 วัน) ค่ากำลังอัดจะมีความแตกต่างกันน้อยมากและจากการวิเคราะห์ Differential Thermal Analysis (DTA) หาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าดินขาวที่ใช้การทดลองมีความไวในการทำ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกใกล้เคียงกับซิลิกาฟุ้ง

Sayamipuk (2000) ได้ศึกษาดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองในประเทศไทย โดยนำดินขาวดิบมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากการทดลองมอร์ต้าผสมดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่ซีเมนต์โดยดินขาวในอัตราส่วนร้อยละ 30 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นอนุภาคของดินขาวยังมีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าเนื่องจากผลของ 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 ค่าการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลจากดินขาวช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ในช่วงอายุเริ่มต้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอื่น (Wild et al., 1996; จิรวัดน์, 2546)

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้เป็นการดำเนินการวิจัยประกอบด้วยวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ใน งานวิจัยตลอดจนขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง 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 x 10 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 x 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

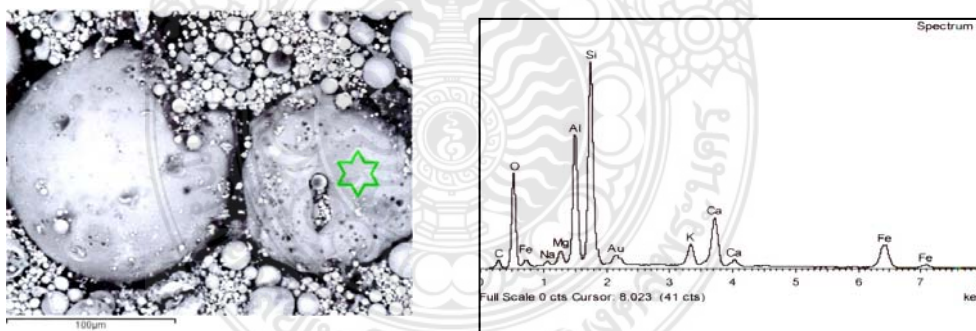
- 3.2.1. ปูนซีเมนต์ (Cement)
- 3.2.2. มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)
- 3.2.3. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)
- 3.2.4. น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต (Water)
- 3.2.5. วัสดุปุ๋ยโซลาน (แก้ลอย และ ดินขาว) (แก้ลอยจากโรงงานผลิตไฟฟ้า จ.ลำปาง และ ดินขาวเผาสำเร็จรูป นำเข้าจากสหรัฐอเมริกา บริษัท Metamax จำกัด ตามรูปที่ 3.1



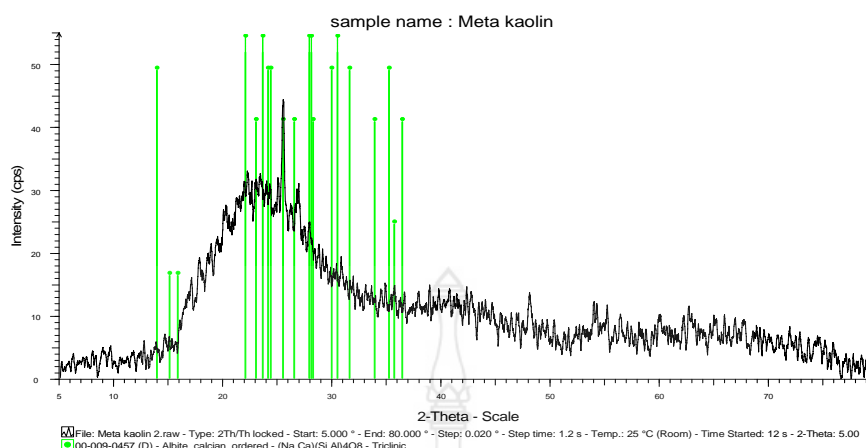
ภาพที่ 3.1 วัสดุประสานประกอบด้วย ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ เถ้าลอย และดินขาว

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ Type I, PFA และ MK

Oxides (%)		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
		Characteristic										
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



ภาพที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาววิเคราะห์ด้วย XRF

3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตและสัญลักษณ์

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยได้ถูกออกแบบตามการแนะนำของ ACI โดยออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ $w/b = 0.40, 0.50$ และ 0.60

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 วิธีการทดสอบและปฏิบัติภาคส่วนผสมคอนกรีต

3.4.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

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

- มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.51, ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 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 6.34 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.00, ค่าร้อยละความชื้นผิวเท่ากับ 0.5 ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เท่ากับ 2.70 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1600 kg/m^3

- น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาดผสมคอนกรีต มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm. ปราศจากกรดต่าง น้ำมัน และอินทรีย์สารอื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต
- วัสดุปอซโซลาน (เถ้าลอย, ดินขาว)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม (สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)

คุณสมบัติ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
หน่วยน้ำหนัก (Bulk Density) กก.ต่อ ลบ.ม.	-	1600
ความดูดซึม (Absorption) เปอร์เซ็นต์	1.30	1.0
ความถ่วงจำเพาะ (Apparent Specific Gravity)	2.65	2.70
โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus)	2.51	6.34

3.4.2 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตและการทดสอบทางกายภาพของมวลรวมประกอบด้วย

สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยได้ถูกออกแบบตามการแนะนำของ ACI 211.1-1 โดยออกแบบให้มีอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.60 0.50 และ 0.40 และอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน 1 : 2.4 : 2.9 โดยปริมาตร ซึ่งปริมาณวัสดุที่ใช้สำหรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 ลบ.ม. ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.60), (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)

ชื่อตัวอย่าง	% pozzolan replacement cement	ปริมาณวัสดุประสาน	ปริมาณซีเมนต์ (Kg/m ³)	ปริมาณเถ้าลอย (Kg/m ³)	ปริมาณดินขาว (Kg/m ³)	หิน (SSD) (Kg/m ³)	ทราย (SSD) (Kg/m ³)	น้ำ
OPC	0	-	261	-	-	721	1066	209
OPC+FA15+MK10	15+10	261	222	39	-	721	1066	209
OPC+FA30+MK10	30+10	261	183	78	-	721	1066	209
OPC+FA45+MK10	45+10	261	144	117	-	721	1066	209

ตารางที่ 3.4 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.50), (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)

ชื่อตัวอย่าง	% pozzolan replacement cement	ปริมาณวัสดุประสาน	ปริมาณซีเมนต์ (Kg/m ³)	ปริมาณเถ้าลอย (Kg/m ³)	ปริมาณดินขาว (Kg/m ³)	หิน (SSD) (Kg/m ³)	ทราย (SSD) (Kg/m ³)	น้ำ
OPC	0	-	261	-	-	721	1066	209
OPC+FA15+MK10	15+10	261	222	39	-	721	1066	209
OPC+FA30+MK10	30+10	261	183	78	-	721	1066	209
OPC+FA45+MK10	45+10	261	144	117	-	721	1066	209

ตารางที่ 3.5 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (w/b = 0.40), (ปริมาณน้ำหนัก กก. ต่อลูกบาศก์เมตร)

ชื่อตัวอย่าง	% pozzolan replacemen t cement	ปริมาณ วัสดุ ประสาน	ปริมาณ ซีเมนต์ (Kg/m ³)	ปริมาณ เถ้าลอย (Kg/m ³)	ปริมาณ ดินขาว (Kg/m ³)	หิน (SSD) (Kg/m ³)	ทราย (SSD) (Kg/m ³)	น้ำ
OPC	0	-	261	-	-	721	1066	209
OPC+FA15+MK10	15+10	261	222	39	-	721	1066	209
OPC+FA30+MK10	30+10	261	183	78	-	721	1066	209
OPC+FA45+MK10	45+10	261	144	117	-	721	1066	209

3.4.3 วิธีการทดสอบ

3.4.3.1 ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ตรวจสอบความยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 3-5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C143-90a “Test method for slump of hydraulic cement concrete”

3.4.3.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอก ตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M “Methods of testing concrete for strength” โดยหล่อขึ้นตัวอย่างขนาด 4”x8” ทำการบ่มขึ้นต่อเนื่องที่ 1, 7 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังอัดโดยวางขึ้นตัวอย่างที่กึ่งกลางแท่นทดสอบให้แกนอยู่แนวศูนย์กลางของแท่นทดสอบให้แรงอัดด้วยอัตราสม่ำเสมอประมาณ 2.55 กก./ตร.ซม./วินาที จนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ ในการทดสอบทุกครั้งต้องทำการ Cap ก่อนตัวอย่างด้วยกำมะถันผลการทดสอบในแต่ละชุดใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบนี้จะได้ผลกำลังอัดเฉลี่ยที่กระทำบนหน้าตัดผิวเรียบสม่ำเสมอของตัวอย่างคอนกรีตโดยสามารถหาลังอัดของตัวอย่างได้จากผลการทดลองจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3-1

$$\text{Ultimate Compressive Strength, } f_c' = \frac{P_{max}}{A} \quad (3-1)$$

เมื่อกำหนดให้ P_{MAX} = น้ำหนักกระทำสูงสุด (กิโลกรัม)
 A = พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)



ภาพที่ 3.4 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานของคอนกรีต ASTM C 39

3.4.3.3 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต (Flexural Strength)

ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C78-94 โดยหล่อตัวอย่างหน้าตัดขนาด 1.5" x 3" ยาว 12" และจากนั้นบ่มขึ้นต่อเนื่องที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังดัด โดยวางตัวอย่างบนแท่นรองรับที่มีระยะระหว่างจุดรองรับ 20 ซม. แล้วให้น้ำหนักกดลงบนจุดกึ่งกลางของช่วงคานด้วยอัตราประมาณ 0.27 กก./ตร.ซม./วินาที จนตัวอย่างวิบัติบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้แล้วหาค่ากำลังดัด (f_b) ได้จาก

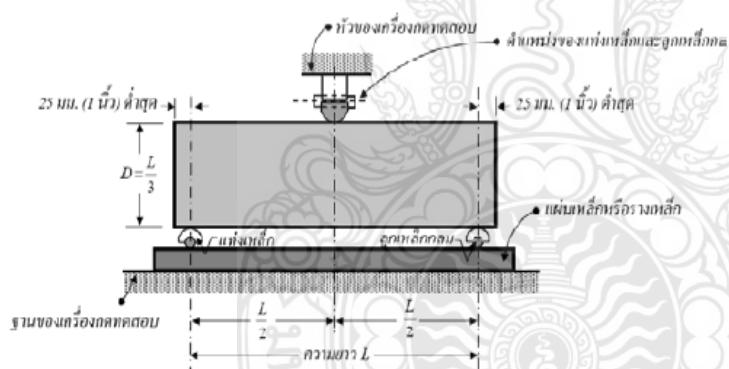
$$f_b = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{กก./ตร.ซม.}$$

เมื่อ P = น้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อคาน (กก.)

b = ความกว้างของตัวอย่างที่วัดบริเวณรอยแตก (ซม.)

d = ความลึกตัวอย่างที่วัดบริเวณรอยแตก (ซม.)

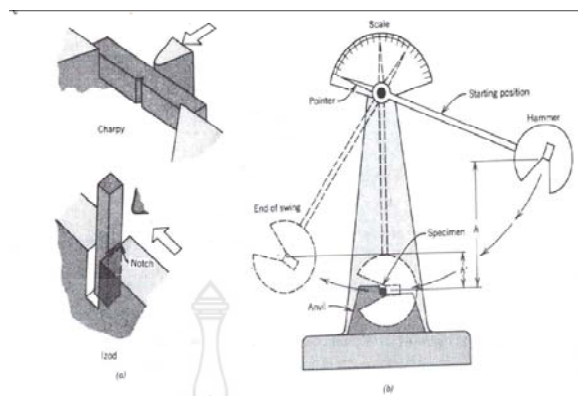
L = ระยะระหว่างฐานรองรับของแท่นทดสอบ (ซม.)



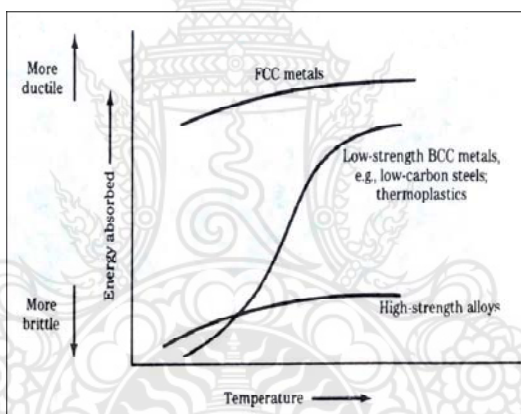
ภาพที่ 3.5 ภาพตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C78-94 (Flexural Test)

3.4.3.4 การทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีต (Impact Strength)

ความแข็งแรงหรือความเหนียวของวัสดุ (Toughness) เป็นสมบัติของวัสดุอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องการดูดกลืนปริมาณพลังงานของวัสดุนั้นจะเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดก่อนจะเกิดการแตกหัก ซึ่งนับว่ามีความสำคัญมากต่องานทางด้านวิศวกรรม โดยพิจารณาจากความทนทานต่อแรงกระแทก (impact) โดยไม่เกิดการแตกหัก วิธีวัดความแข็งแรงของวัสดุที่ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง คือใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact testing machine) ดังภาพที่ 3.6

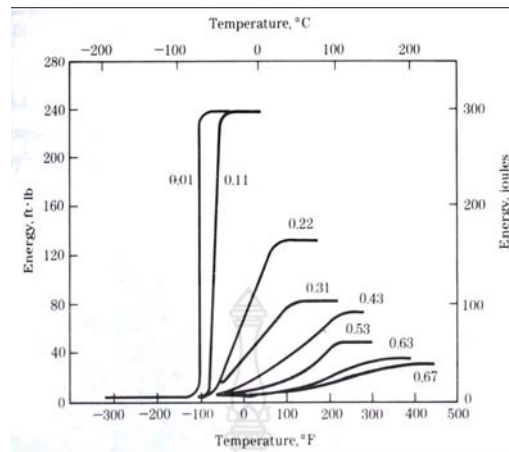


ภาพที่ 3.6 แสดงการทดสอบแรงกระแทก (a) แสดงตัวอย่างที่ใช้ Charpy and Izod test
(b) แสดงภาพวาดของเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก



ภาพที่ 3.7 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดกลืนพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกของวัสดุบางชนิด

จากภาพที่ 3.7 แสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดกลืนพลังงานของวัสดุบางชนิด Impact test นี้สามารถนำมาใช้ทดสอบหาช่วงของอุณหภูมิของการเปลี่ยนสมบัติและพฤติกรรมของโลหะและโลหะผสมจากอ่อน (ductile) ไปเป็นแข็งเปราะ นั่นคือ เหล็กอ่อนที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะทำให้เหล็กแข็งมากขึ้น และดูดกลืนพลังงานน้อยลง ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนต่ำจะดูดกลืนพลังงานได้ดี คือเป็นเหล็กที่อ่อนหรือเหนียวขึ้น แต่เกิดในช่วงอุณหภูมิที่แคบ และเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำการทดสอบ Fracture toughness ของโลหะและโลหะผสมได้มีการพัฒนาวิธีทดสอบที่ซับซ้อนอื่น ๆ อีกดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 กราฟแสดงผลของปริมาณของคาร์บอนที่มีต่อ impact energy และอุณหภูมิสำหรับเหล็กที่ทำให้ร้อนขึ้น



บทที่ 4

วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ

การนำเสนอผลของโครงการวิจัยนี้ เป็นการอธิบายการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของคอนกรีตในด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดและแรงกระแทกของปอซโซลานคอนกรีต

4.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 เซนติเมตร หล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่ากำลังอัด

4.1.1 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาว

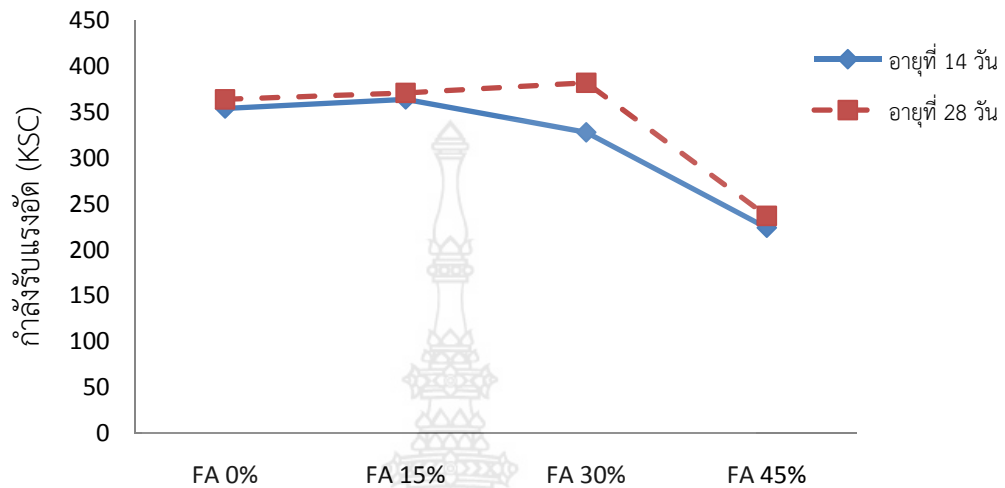
4.1.1.1 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

ตารางที่ 4.1 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

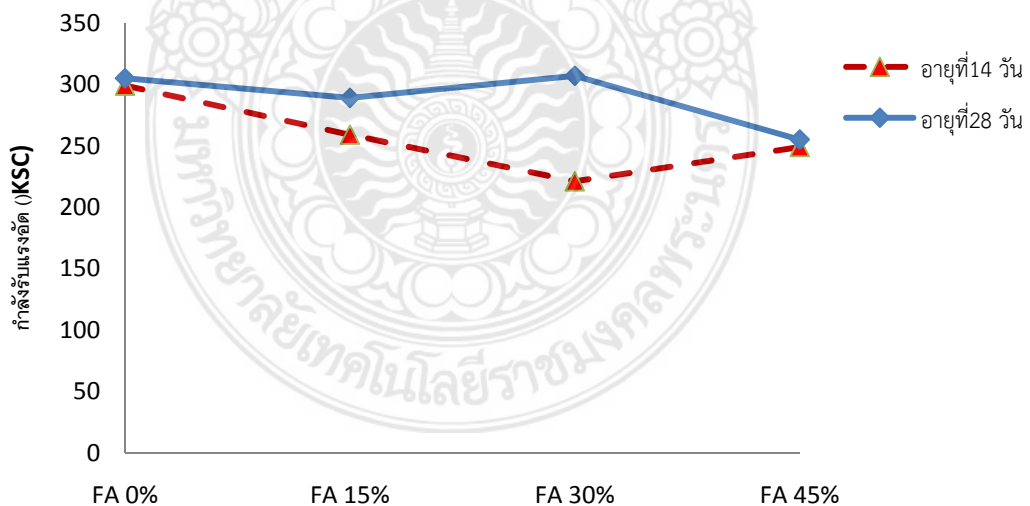
W/B	% Fly ash replacement	Compressive strength (ksc.)	
		14 days	28 days
0.40	0	354	364
	15	364	371
	30	328	382
	45	224	237
0.45	0	299	305
	15	259	289
	30	221	307
	45	249	255

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน และ w/b = 0.40 มีค่ามากกว่าที่อายุ 14 วัน และมากกว่า w/b = 0.45 ทุกส่วนผสม มีค่าเท่ากับ 364 กก./ตร.ซม. ให้ค่าน้อยกว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 30 และมีแนวโน้มให้ค่ามากกว่า การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 15 และ 45 กก./ตร.ซม. จะเห็นได้ว่าการกำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 45 กำลังอัดของ

คอนกรีตจึงลดลง ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเพิ่มมากกว่าร้อยละ 45 กำลังจะลดลง จากภาพที่ 4.1-4.2



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย เมื่อ $w/b = 0.40$



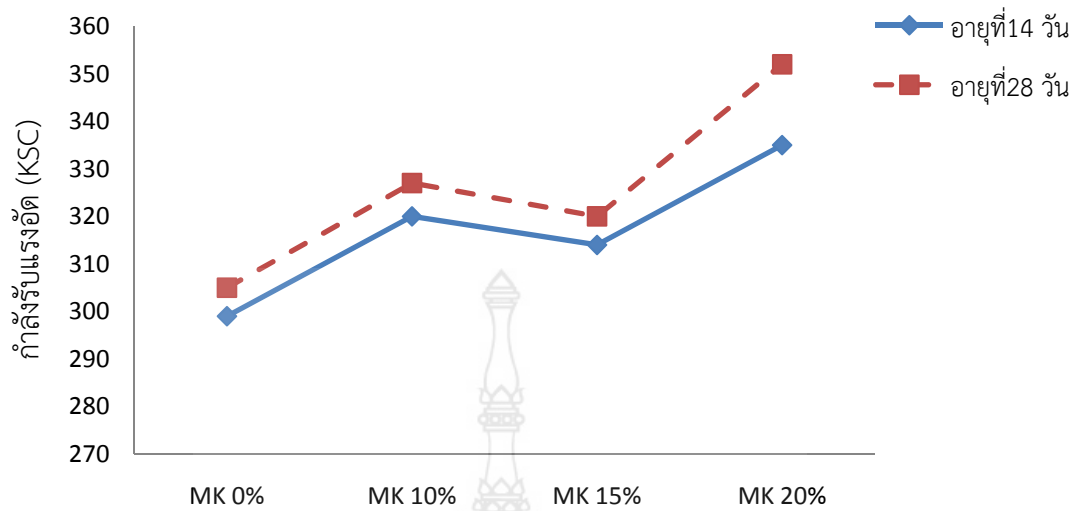
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย เมื่อ $w/b = 0.45$

4.1.1.2 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว

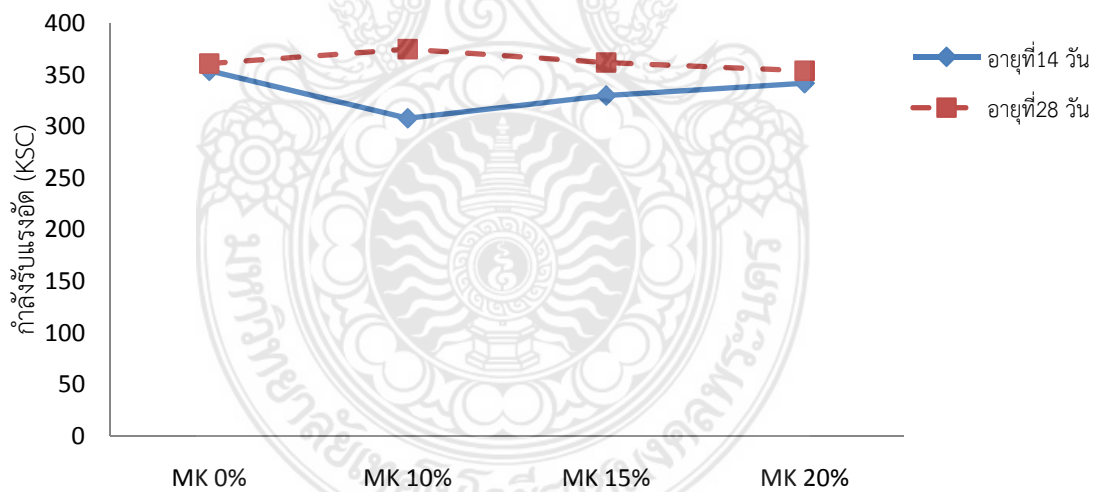
ตารางที่ 4.2 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว

W/B	% Kaolin replacement	Compressive strength (ksc.)	
		14 days	28 days
0.40	0	354	361
	10	308	375
	15	330	362
	20	342	354
0.45	0	299	305
	10	320	327
	15	314	320
	20	335	352

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน และ w/b = 0.40 มีค่ามากกว่าที่อายุ 14 วัน และมากกว่า w/b = 0.45 ทุกส่วนผสม มีค่าเท่ากับ 361 กก./ตร.ซม. แต่มีแนวโน้มให้ค่าน้อยกว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่ร้อยละ 10 (375 ksc), 15 (362ksc) และ 20 (354 ksc) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา w/b = 0.45 แนวโน้มให้ค่ามากกว่า การแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่ร้อยละ 10,15 และ 20 ksc จะให้ค่าน้อยกว่าที่ w/b = 0.40 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งการแทนที่ด้วยดินขาวที่ร้อยละ 20 กำลังอัดของคอนกรีตจึงลดลง ทั้งนี้กำลังอัดคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 20 จะส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มที่ลดลง ตามภาพที่ 4.3-4.4



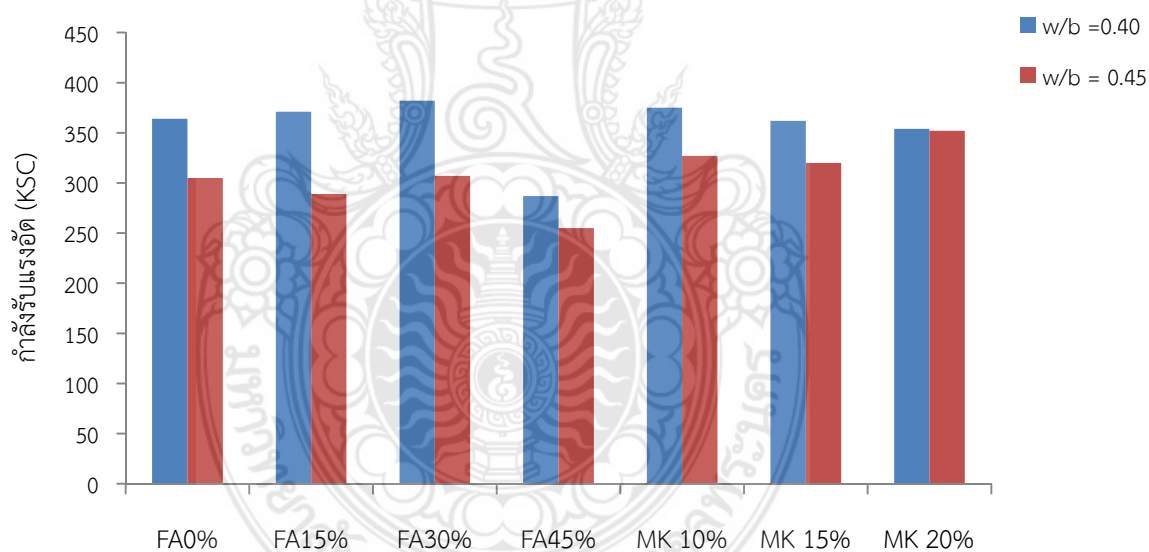
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว เมื่อ $w/b = 0.40$



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว เมื่อ $w/b = 0.45$

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาว ที่อายุ 28 วัน

Mixed	%	Compressive strength (ksc.)	
		w/b = 0.40	w/b = 0.45
FA	0	364	305
	15	371	289
	30	382	307
	45	237	255
MK	0	361	305
	10	375	327
	15	362	320
	20	354	352



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาว ที่อายุ 28 วัน

พบว่าเมื่อพิจารณา w/b = 0.40 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า w/b = 0.45 ทุกสัดส่วนผสม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาวพบว่า แนวโน้มกำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงขึ้นมาที่สุดที่ร้อยละ 30 ของเถ้าลอย และมีค่ามากที่สุดที่ร้อยละ 10 สามารถสรุปได้ว่าปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ในขณะที่ ปริมาณร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามไปสูงสุดที่ร้อยละ 30

4.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

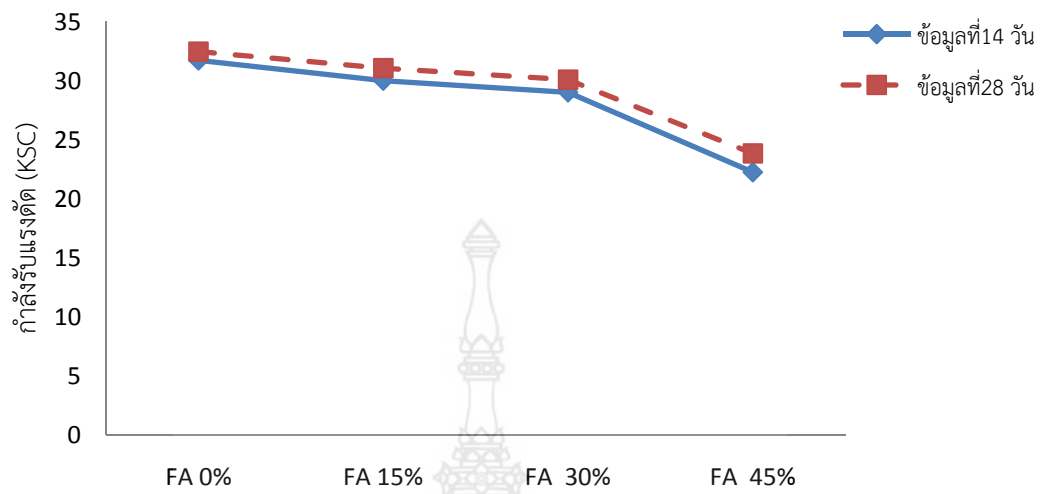
การทดสอบกำลังรับแรงดัดใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 15 x 15 x 100 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่ากำลังดัด

4.2.1 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

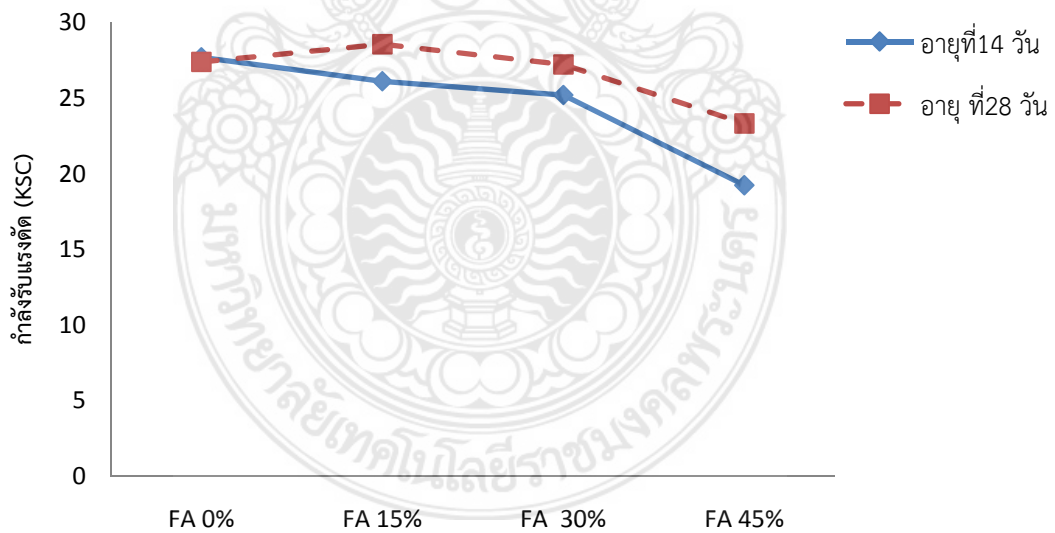
ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

W/B	% Fly ash replacement	Flexural strength (ksc)	
		14 days	28 days
0.40	0	31.74	32.48
	10	30.02	31.08
	15	29.03	30.1
	20	22.26	23.85
0.45	0	27.69	27.39
	10	26.11	28.56
	15	25.20	27.22
	20	31.74	23.32

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน และ w/b = 0.40 มีค่ามากกว่าที่อายุ 14 วัน และมากกว่า w/b = 0.45 ทุกส่วนผสม มีค่าเท่ากับ 31.74 ksc และมีแนวโน้มให้ค่าน้อยกว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 15 (30.02 ksc), 30 (29 ksc) และ 45 (22.26 ksc) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา w/b = 0.45 แนวโน้มของกำลังรับแรงดัดลดลงตามปริมาณ การแทนที่ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอยที่ร้อยละ 15, 30 และ 45 ksc ตามลำดับ ซึ่งทุกส่วนผสมจะให้ค่าน้อยกว่าที่ w/b = 0.40 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 วัน จะมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 45 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตจึงลดลง ทั้งนี้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่า ร้อยละ 45 จะส่งผลให้กำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มที่ลดลง



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย เมื่อ $w/b = 0.40$



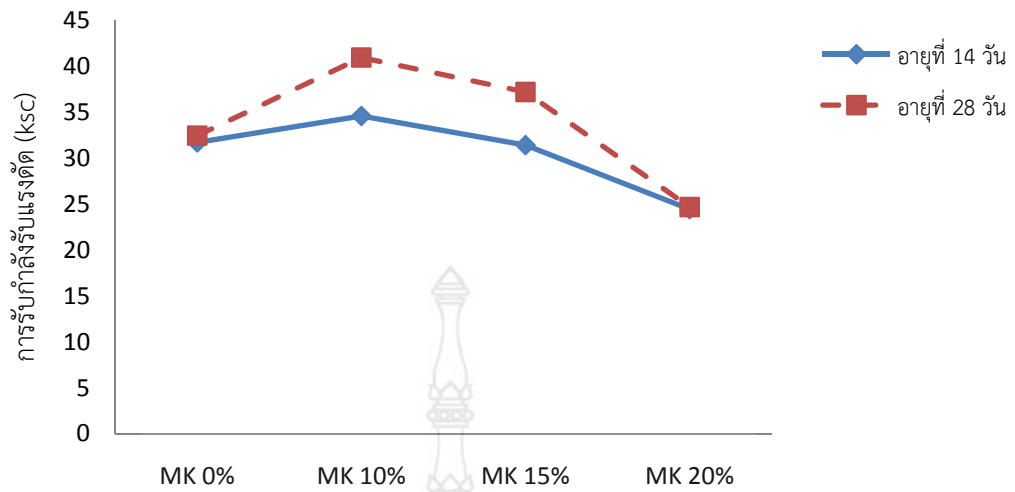
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย เมื่อ $w/b = 0.45$

4.2.1.2 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว

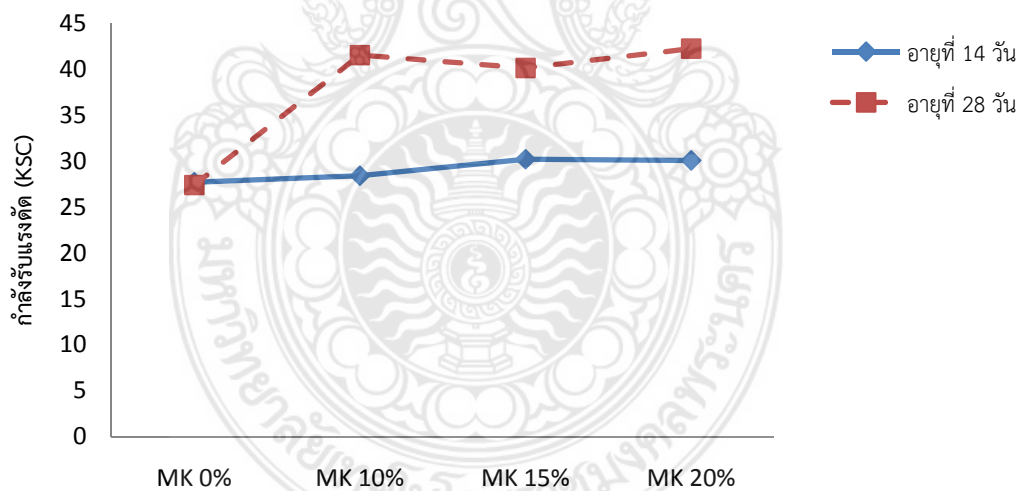
ตารางที่ 4.5 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว

W/B	% Kaolin replacement	Flexural strength (ksc)	
		14 days	28 days
0.40	0	31.74	32.48
	10	34.62	40.99
	15	31.44	37.23
	20	24.47	24.70
0.45	0	27.69	27.39
	10	28.40	41.55
	15	30.20	40.14
	20	30.07	42.26

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน และ w/b = 0.40 มีค่ามากกว่าที่อายุ 14 วัน และมากกว่า w/b = 0.45 ทุกส่วนผสม มีค่าเท่ากับ 31.74 ksc แต่มีแนวโน้มให้ค่าน้อยกว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 10 (34.62 ksc) ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดัด สูงกว่าการแทนที่ด้วยดินขาวที่ร้อยละ 10 และ 15 ทั้งสองอัตราส่วน w/b = 0.45 และ 0.40 ตามลำดับ หากพิจารณาอัตราส่วน w/b = 0.40 การแทนที่ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นของดินขาวที่ร้อยละ 10, 15 และ 20 ksc ตามลำดับ แนวโน้มค่ากำลังรับแรงดัดจะมีค่าลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับ อัตราส่วน w/b = 0.45 แนวโน้มค่ากำลังรับแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุ 14 วัน จะมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นไปอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งการแทนที่ด้วยดินขาวที่ร้อยละ 20 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตจึงลดลง ทั้งนี้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 15 จะส่งผลให้กำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มที่ลดลง



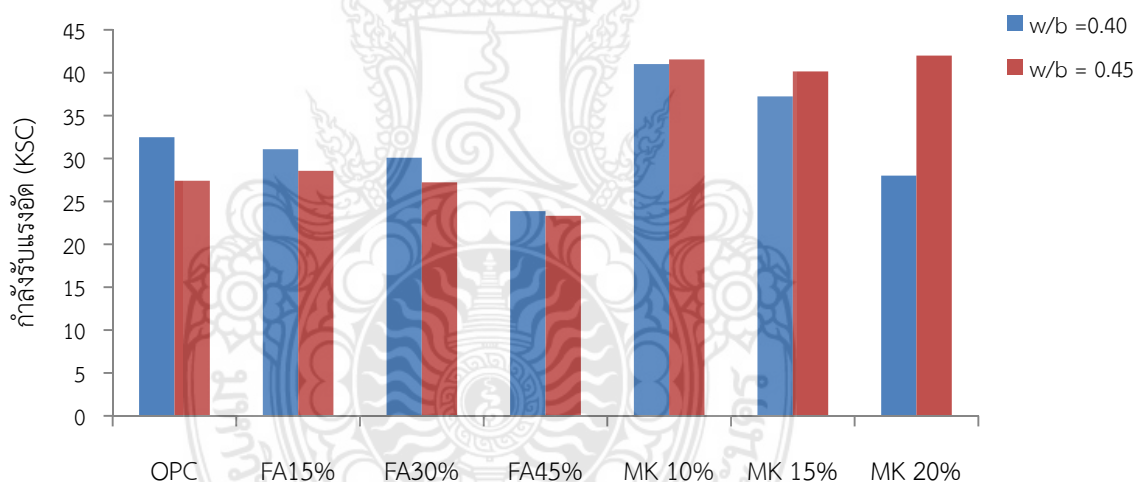
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว เมื่อ $w/b = 0.40$



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว เมื่อ $w/b = 0.45$

ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาว ที่อายุ 28 วัน

Mixed	%	Flexural strength (ksc.)	
		w/b = 0.40	w/b = 0.45
FA	replacement		
	0	32.48	27.39
	15	31.08	28.56
	30	30.1	27.22
MK	45	23.85	23.32
	0	32.48	27.39
	10	40.99	41.55
	15	37.23	40.14
	20	24.70	42.26



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาว ที่อายุ 28 วัน

พบว่าเมื่อพิจารณา $w/b = 0.40$ จะให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่า $w/b = 0.45$ ทุกสัดส่วนผสม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในขณะที่ $w/b = 0.45$ จะให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่า $w/b = 0.40$ ทุกสัดส่วนผสม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัด การแทนที่ด้วยดินขาว มีแนวโน้มให้ค่าสูงมากกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทุกส่วนผสม และดินขาวมีค่ามากที่สุดที่ร้อยละ 10 สรุปได้ว่าปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงดัดลดลงที่ร้อยละ 20 เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย

4.3 การทดสอบกำลังรับแรงกระแทก (Impact Strength)

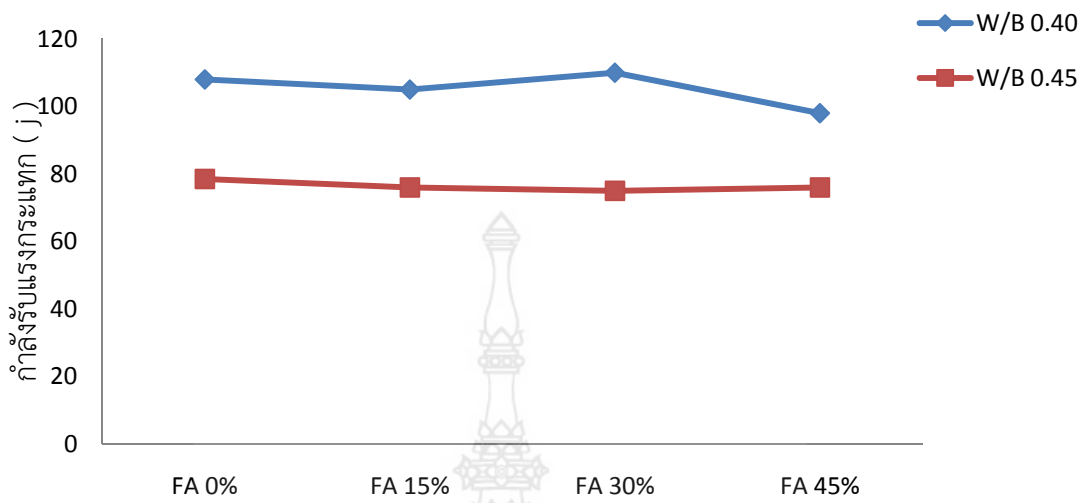
การทดสอบกำลังรับแรงดัดใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 5 x 5 x 15 เซนติเมตร ภายหลังจากหล่อคอนกรีตทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออกซึ่งตัวอย่างทดสอบที่เตรียมได้ จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปบ่มในสภาวะ บ่มน้ำ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM ค่า Load-Deflection ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่ากำลังดัด

4.4.1 กำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาวที่ อายุ 28 วัน

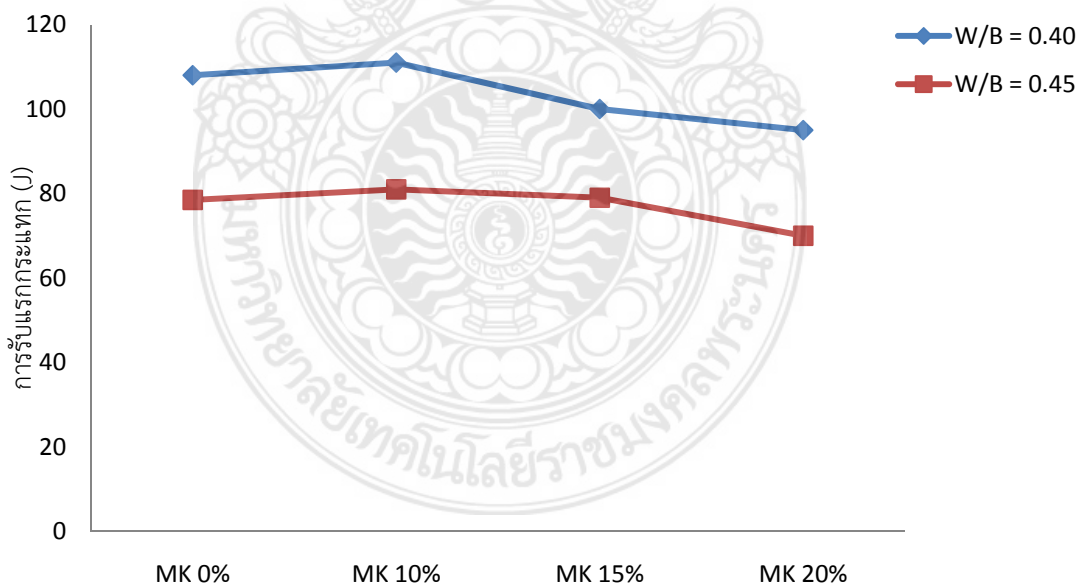
ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังรับแรงกระแทกของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาว

Type of Concrete	Drop Weight 15 kg	
	Impact Energy (N.m) (j)	
	w/b = 0.40	w/b = 0.45
M/Control	108	78.5
M/FA15	105	76
M/FA30	110	75
M/FA45	98	76
M/MK10	111	81
M/MK15	100	79
M/MK20	95	70

ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน โดยน้ำหนักลูกตุ้ม 15 กก. คอนกรีตเกิดการวิบัติในครั้งเดียว ซึ่งค่าพลังงานกระแทกคอนกรีต M/MK10 มีค่าเท่ากับ 111 Joule ให้ค่าสูงที่สุด มากกว่า M/FA30 มีค่าเท่ากับ 110 joule, M/Control มีค่าเท่ากับ 108 joule, M/FA15 มีค่าเท่ากับ 105 joule , M/MK15 มีค่าเท่ากับ 100 joule, M/FA45 มีค่าเท่ากับ 98 joule และ M/MK20 มีค่าเท่ากับ 95 joule ตามลำดับ หากพิจารณาอัตราส่วน w/b = 0.40 จะมีแนวโน้ม ให้ค่าพลังงานรับแรงกระแทกมากกว่า w/b = 0.50 ในทุกสัดส่วนการผสม



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำของคอนกรีตกับร้อยละของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้พิจารณาถึงผลของงานวิจัยเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของปอซโซลานคอนกรีตในด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดและกำลังรับการกระแทกของปอซโซลานคอนกรีตสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของปอซโซลานคอนกรีต

5.1.1 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

พบว่าเมื่อพิจารณา $w/b = 0.40$ จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า $w/b = 0.45$ ทุกสัดส่วนผสม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและดินขาวพบว่า แนวโน้มกำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงขึ้นมาที่สุดที่ร้อยละ 30 ของเถ้าลอย และมีค่ามากที่สุดที่ร้อยละ 10 ของดินขาว สามารถสรุปได้ว่าปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ในขณะที่ ปริมาณร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามไปสูงสุดที่ร้อยละ 30

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ของปอซโซลานเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว ให้ค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันกับเถ้าลอย เนื่องจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก

5.1.2 การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength)

พบว่าเมื่อพิจารณา $w/b = 0.40$ จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า $w/b = 0.45$ ทุกสัดส่วนผสม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในขณะที่ $w/b = 0.45$ จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า $w/b = 0.40$ ทุกสัดส่วนผสมการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัด การแทนที่ด้วยดินขาว มีแนวโน้มให้ค่าสูงมากกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทุกส่วนผสม และดินขาวมีค่ามากที่สุดที่ร้อยละ 10 สรุปได้ว่าปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงที่ร้อยละ 20 เช่นเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ของปอซโซลานเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว ให้ค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันกับเถ้าลอย เนื่องมาจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CSH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น

5.1.3 การทดสอบกำลังรับแรงกระแทก (Impact Strength)

ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน ค่าพลังงานกระแทกคอนกรีต M/MK10 ให้ค่าสูงที่สุด มากกว่า M/FA30, M/FA15, M/MK15, M/FA45 และ M/MK20 ตามลำดับ หากพิจารณาอัตราส่วน $w/b = 0.40$ จะมีแนวโน้ม ให้ค่าพลังงานรับแรงกระแทกมากกว่า $w/b = 0.50$ ในทุกสัดส่วนการผสม และจะสังเกตได้ว่า

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ของปอซโซลานเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงกระแทกเพิ่มมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมปอซโซลานใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยดินขาว ให้ค่ากำลังรับแรงกระแทก มากกว่าเถ้าลอย เนื่องมาจากสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเนื้อคอนกรีตเปลี่ยนเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (CAH, CAH) ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตนั้นล้วนมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งสิ้น ดังนั้นจึงควรศึกษาผลของปัจจัยเหล่านั้น เช่น ขนาดของมวลรวมหยาบ คุณสมบัติของเถ้าลอย คุณสมบัติของดินขาว และ สารลดน้ำ นอกจากนี้การเร่งกำลังของคอนกรีตด้วยน้ำก็เป็นปัจจัย

5.2.2 ขนาดของชิ้นตัวอย่างนี้ใช้ในการทดลองนี้ใช้เพียงขนาดเดียว การศึกษาเกี่ยวกับผลของขนาดชิ้นตัวอย่างต่อคุณสมบัติของคอนกรีตจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ควรให้ความสำคัญเพื่อนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงได้แม่นยำ

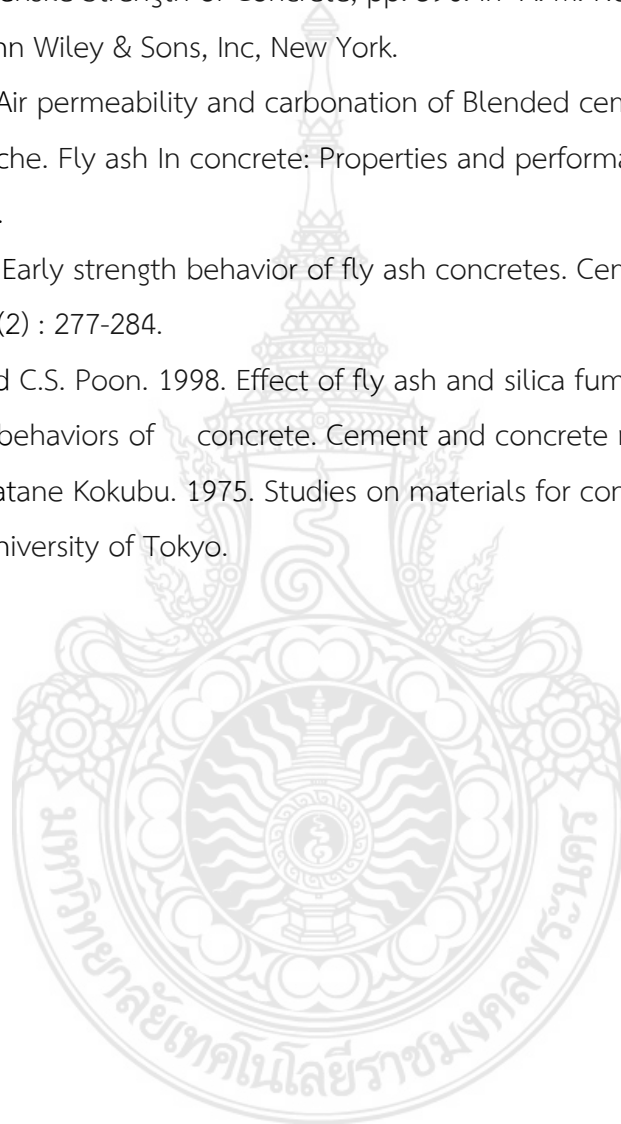
5.2.3 ในการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตนั้นทดสอบโดยการปล่อยลูกตุ้มน้ำหนักที่มีความสูงเดียว จึงเป็นการทดสอบการรับแรงกระแทกที่ความเร็วค่าเดียว ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบการรับแรงกระแทกที่ความเร็วต่างๆกัน

5.2.4 ในการทดสอบการรับแรงกระแทกของคอนกรีตนั้นทดสอบโดยการปล่อยลูกตุ้มน้ำหนักเพียงน้ำหนักเดียว จึงไม่มีข้อเปรียบเทียบที่มากกว่าหนึ่งในน้ำหนักของลูกตุ้มน้ำหนัก

บรรณานุกรม

- เจริญชาย ตังฉัตรแก้ว, ธีรยุทธ วิวัฒนา และไพโรจน์ เทพเจริญนิรันดร์ 2540. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด, กำลังดึง และกำลังดัด ของคอนกรีตซึ่งมีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินที่บดละเอียด.
- ปริญญา นิพนธ์ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และวารภรณ์ คุณาวานากิจ 2543. คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย, น.7-19. ในเอกสารการสัมมนาเรื่อง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุใน คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธาสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- ประจित จีร์ปภา, 2526. คอนกรีตผสมซีเมนต์แม่เมาะ, น. IV 144- 159. ในการประชุมทางวิชาการเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชนบท ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น
- สมชัย กกก้าแหง. 2542. การใช้เถ้าลอยในงานก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, น. 65-79. ในเอกสารการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, นนทบุรี
- เอกภพ อังศ์วัฒนา, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ทิน เกตุรัตน์บวร. 2541. การใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง, น. 36-45. ในวารสาร กผผ. 7, 2(เม.ย.-มิ.ย.)
- เอกสิทธิ์ ลีมสุวรรณ และวิศวะ จักรไพศาล. 2542. ผลกระทบของซีเมนต์ เถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลกำลังอัดของคอนกรีต สมรรถนะสูง, น. 90-98. ในเอกสารการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้า ลอยในงานคอนกรีต. คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุในคณะกรรมการสาขาวิศวกรรมโยธาสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- A. J. Zielinski and H. W. Reinhardt. 1982. Impact stress-strain behavior in concrete intension, pp. 345. In A. M. Neville. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- ACI Committee 226. 1987. Use of Fly Ash in Concrete. ACI Materials J. 84 : 381-409
- ASTM C 618-94a. 1995. Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture In Portland Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02
- A. M. Neville. 1997. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- A. Mokhtarzadeh and C. French. 2000. Mechanical properties of high-strength concrete with consideration for precast applications. ACI Materials J. 97, (2) : 136-147
- D. W. Harris, C. E. Mohorovic, and T. P. Dolen. 2000. Dynamic Properties of Mass Concrete Obtained from Dam Cores. ACI Materials J. ,Vol. 97, No.3, pp.290-296.
- Ferdinand P. Beer. 1992. Mechanics of materials. McGRAW-HILL Inc, Singapore.

- G. B. Welch and B. Haisman. 1969. Fracture toughness measurements of concrete, pp.344. *In* A. M. Neville. Properties of concrete. John Wiley & Sons Inc, New York.
- H. Green. 1964. Impact strength of concrete, pp. 62-63. *In* P. Kumar Mehta. Concrete : Structure, properties, and materials. Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- Helmuth, Richard. 1987. Fly ash in cement and concrete. Portland cement association, Skokie.
- J. M. Raphael. 1984. Tensile Strength of Concrete, pp. 596. *In* A. M. Neville. Properties of Concrete. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Kasai, Y. ET AL. 1983. Air permeability and carbonation of Blended cement mortars, pp. 62. *In* K. Wesche. Fly ash In concrete: Properties and performance. Chapman & Hall, London.
- K. Ganesh Babu.1994. Early strength behavior of fly ash concretes. Cement and concrete research 24 (2) : 277-284.
- L. Lam, Y.L. Wong, and C.S. Poon. 1998. Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete. Cement and concrete research 28 (2) : 271-283
- Masatane Kokubu. 1975. Studies on materials for concrete structures. University of Tokyo.



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและกายภาพ



ตารางที่ ก-1 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	376.90	353.93
	2	20	10	372.20	
	3	20	10	312.70	
28	1	20	10	367.20	321.03
	2	20	10	339.70	
	3	20	10	247.20	

ตารางที่ ก-2 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	267.90	363.53
	2	20	10	197.00	
	3	20	10	249.50	
28	1	20	10	333.10	356.60
	2	20	10	427.80	
	3	20	10	310.90	

ตารางที่ ก-3 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	340.40	327.70
	2	20	10	315.00	
	3	20	10	0	
28	1	20	10	369.70	381.45
	2	20	10	393.20	
	3	20	10	0	

ตารางที่ ก-4 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	199.20	223.60
	2	20	10	0	
	3	20	10	248.00	
28	1	20	10	127.30	165.07
	2	20	10	191.20	
	3	20	10	176.70	

ตารางที่ ก-5 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	286.30	298.90
	2	20	10	311.50	
	3	20	10	193.00	
28	1	20	10	261.70	305.06
	2	20	10	353.80	
	3	20	10	299.70	

ตารางที่ ก-6 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	267.90	258.70
	2	20	10	197.00	
	3	20	10	249.50	
28	1	20	10	290.30	288.90
	2	20	10	323.40	
	3	20	10	253.00	

ตารางที่ ก-7 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	263.10	221.03
	2	20	10	201.80	
	3	20	10	198.20	
28	1	20	10	341.40	307.13
	2	20	10	240.70	
	3	20	10	339.30	

ตารางที่ ก-8 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	242.90	248.83
	2	20	10	259.50	
	3	20	10	244.10	
28	1	20	10	213.60	246.07
	2	20	10	244.00	
	3	20	10	280.60	

ตารางที่ ก-9 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	376.90	353.93
	2	20	10	372.20	
	3	20	10	312.70	
28	1	20	10	367.20	321.03
	2	20	10	339.70	
	3	20	10	247.20	

ตารางที่ ก-10 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	298.90	308.43
	2	20	10	291.10	
	3	20	10	335.30	
28	1	20	10	382.80	374.87
	2	20	10	353.70	
	3	20	10	346.90	

ตารางที่ ก- 11 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	336.80	341.65
	2	20	10	346.50	
	3	20	10	259.10	
28	1	20	10	391.40	362.23
	2	20	10	292.90	
	3	20	10	346.90	

ตารางที่ ก-12 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	336.80	341.65
	2	20	10	346.50	
	3	20	10	259.10	
28	1	20	10	216.30	291.77
	2	20	10	292.90	
	3	20	10	366.10	

ตารางที่ ก- 13 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	286.30	298.90
	2	20	10	311.50	
	3	20	10	193.00	
28	1	20	10	261.70	305.06
	2	20	10	353.80	
	3	20	10	299.70	

ตารางที่ ก- 14 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	331.60	320.30
	2	20	10	229.80	
	3	20	10	309.80	
28	1	20	10	213.13	316.70
	2	20	10	296.80	
	3	20	10	336.60	

ตารางที่ ก-15 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	334.60	329.83
	2	20	10	342.30	
	3	20	10	312.60	
28	1	20	10	289.10	315.37
	2	20	10	351.40	
	3	20	10	305.60	

ตารางที่ ก-16 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 20% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)		Compressive Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B		
14	1	20	10	283.80	312.40
	2	20	10	293.30	
	3	20	10	360.10	
28	1	20	10	370.20	352.30
	2	20	10	322.90	
	3	20	10	363.80	

ตารางที่ ก-17 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	27.13	31.74
	2	40	10	10	34.29	
	3	40	10	10	33.82	
28	1	40	10	10	33.06	32.48
	2	40	10	10	30.34	
	3	40	10	10	34.40	

ตารางที่ ก-18 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	31.54	30.02
	2	40	10	10	30.18	
	3	40	10	10	28.35	
28	1	40	10	10	30.93	31.08
	2	40	10	10	31.64	
	3	40	10	10	30.68	

ตารางที่ ก-19 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	31.15	29.03
	2	40	10	10	28.65	
	3	40	10	10	28.26	
28	1	40	10	10	24.13	27.64
	2	40	10	10	30.02	
	3	40	10	10	28.77	

ตารางที่ ก-20 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	20.64	22.26
	2	40	10	10	22.18	
	3	40	10	10	19.02	
28	1	40	10	10	27.33	23.85
	2	40	10	10	23.98	
	3	40	10	10	22.16	

ตารางที่ ก-21 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	25.92	31.74
	2	40	10	10	27.79	
	3	40	10	10	29.37	
28	1	40	10	10	27.07	27.39
	2	40	10	10	29.31	
	3	40	10	10	25.81	

ตารางที่ ก-22 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	23.90	26.11
	2	40	10	10	28.31	
	3	40	10	10	26.13	
28	1	40	10	10	27.48	28.56
	2	40	10	10	28.79	
	3	40	10	10	29.43	

ตารางที่ ก-23 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 30% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	28.60	29.40
	2	40	10	10	29.63	
	3	40	10	10	30.02	
28	1	40	10	10	29.12	27.22
	2	40	10	10	26.06	
	3	40	10	10	26.49	

ตารางที่ ก-24 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 45 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	20.28	19.24
	2	40	10	10	22.07	
	3	40	10	10	18.25	
28	1	40	10	10	21.81	23.32
	2	40	10	10	25.52	
	3	40	10	10	22.64	

ตารางที่ ก-25 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ผสมดินขาว ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	27.13	31.74
	2	40	10	10	34.29	
	3	40	10	10	33.82	
28	1	40	10	10	33.06	32.48
	2	40	10	10	30.34	
	3	40	10	10	34.40	

ตารางที่ ก-26 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	31.93	34.62
	2	40	10	10	36.00	
	3	40	10	10	35.93	
28	1	40	10	10	39.32	40.99
	2	40	10	10	42.81	
	3	40	10	10	40.85	

ตารางที่ ก-27 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 15 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	31.59	31.44
	2	40	10	10	28.65	
	3	40	10	10	34.10	
28	1	40	10	10	36.19	37.23
	2	40	10	10	35.73	
	3	40	10	10	39.79	

ตารางที่ ก-28 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมดินขาว 20 % ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	23.39	24.47
	2	40	10	10	26.51	
	3	40	10	10	23.52	
28	1	40	10	10	23.27	24.70
	2	40	10	10	28.21	
	3	40	10	10	22.63	

ตารางที่ ก- 29 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตไม่ดินขาว ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	25.92	27.69
	2	40	10	10	27.79	
	3	40	10	10	29.37	
28	1	40	10	10	27.07	27.39
	2	40	10	10	29.31	
	3	40	10	10	25.81	

ตารางที่ ก- 30 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 10% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	27.07	28.40
	2	40	10	10	28.60	
	3	40	10	10	29.54	
28	1	40	10	10	39.25	41.55
	2	40	10	10	43.48	
	3	40	10	10	41.93	

ตารางที่ ก-31 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 15% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	29.87	30.20
	2	40	10	10	28.66	
	3	40	10	10	32.09	
28	1	40	10	10	30.06	28.78
	2	40	10	10	27.29	
	3	40	10	10	19.20	

ตารางที่ ก-32 ทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 20% ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Age (days)	Sample No.	Dimension (cm)			Flexural Strength (ksc.)	Average. (ksc.)
		L	B	A		
14	1	40	10	10	28.61	30.07
	2	40	10	10	28.94	
	3	40	10	10	32.66	
28	1	40	10	10	44.36	42.26
	2	40	10	10	41.35	
	3	40	10	10	41.08	

ภาคผนวก ข

รูปภาพวิธีการทดสอบ





ภาพที่ ข-1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต



ภาพที่ ข-2 แบบหล่อคอนกรีต



ภาพที่ ข-3 ตัวอย่างใช้สำหรับทดสอบ



รูปภาพที่ ข-4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก

