บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

บทนี้กล่างถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าแกลบบดละเอียด โดยการทดสอบกำลังอัด และการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยมีลำดับเสนอผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

1. คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ
2. คุณสมบัติทางเคมี
3. ผลการทดสอบกำลังอัด
4. ผลการดสอบคลอไรด์แบบวิธีการเปรียบเทียบสี

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

1. ความถ่วงจำเพาะของ

จากผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 188 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการใช้ตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง โดยค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.14 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ประเภทที่ 1 (มอก. 15-2547) และค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบบดละเอียดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.27

2. ความละเอียดของอนุภาค

โดยการใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ที่มีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร ในการหาความละเอียดของตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 10.8 โดยน้ำหนัก และเถ้าแกลบบดละเอียดมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 2.8 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials C 618 (1997 F : 296-298) ได้กำหนดไว้ว่าเถ้าถ่านหินที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต้องมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

3. การทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะ

โดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้แบบเบลน ตามมาตรฐาน ASTM C 204 โดยเป็นการวัดหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยหาได้จากพื้นที่ผิวนอกทั้งหมดของตัวอย่างต่อหน่วยน้ำหนักตัวอย่าง

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ซึ่งพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบบดละเอียด มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3,270 และ 6,850 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เถ้าแกลบบดละเอียดมีขนาดอนุภาคที่เล็ก หรือละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า

4. วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวอนุภาค

โดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer หาค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบบดละเอียด มีค่าเท่ากับ 13.0 และ 6.3 ไมครอน ตามลำดับ จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่า ขนาดของปูนซีเมนต์ และเถ้าแกลบบดละเอียด มีขนาดที่ห่างกันประมาณ 2 เท่า ดังแสดงในตาราง 4

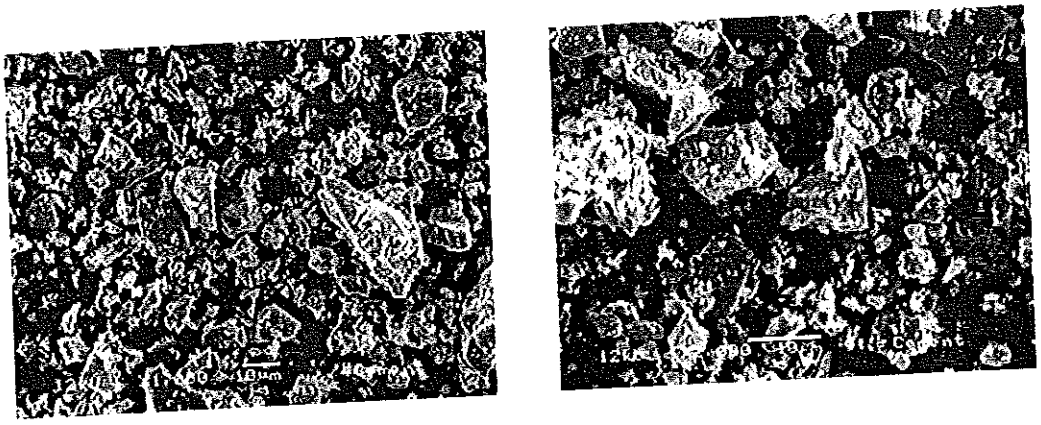
ตาราง 4 องค์ประกอบทางกายภาพของวัสดุ

Sample	OPC	GRHA
Specific gravity	3.14	2.27
Retaining on a sieve No.325 (%)	10.8	2.8
Blaine fineness (cm^2/g)	3,270	6,850
Median particle size (μm)	13.0	6.3

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

5. ภาพขยายกำลังสูง

ทำการถ่ายภาพโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างลักษณะโดยส่วนมากเป็นเหลี่ยมเป็นมุม พื้นผิวค่อนข้างเรียบ เนื้อแน่นไม่มีรูพรุน ดังแสดงในภาพประกอบ 13 ส่วนรูปร่างลักษณะของเถ้าแกลบก่อนนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบตกกระทบ สังเกตได้อย่างชัดเจน คือ จะมีขนาดที่ใหญ่ มีความพรุนสูง และมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน บางครั้งคล้ายรังผึ้ง หลังจากที่นำไปบดแล้วทำให้รูปร่างลักษณะเปลี่ยนไป รูปร่างที่เล็กลงทำให้ผิวที่มีความพรุนหายไป มีรูปร่างลักษณะที่แน่นอนขึ้น เป็นเหลี่ยมเป็นมุม ผิวเรียบบ้างขรุขระบ้าง เล็กบ้างใหญ่บ้างคละกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 13 ภาพถ่ายขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ภาพประกอบ 14 ภาพถ่ายขยายอนุภาคเถ้าแกลบก่อนบด และหลังบด

RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

คุณสมบัติทางเคมี

จากตาราง 5 แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก คือ มีค่าสูงถึงร้อยละ 64.9 และมีองค์ประกอบรอง คือ ออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) อยู่ปริมาณร้อยละ 20.62, 5.22 และ 3.10 ตามลำดับ

ในส่วนของเถ้าแกลบบดละเอียด มีปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก เท่ากับร้อยละ 90.20, 0.67 และ 0.95 ตามลำดับ โดยผลรวมของออกไซด์ทั้ง 3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.82 และมีปริมาณของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เท่ากับร้อยละ 0.21 จากข้อมูล

แกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 108 และ 114 ของคอนกรีตควบคุม และเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 30 และร้อยละ 40 กำลังอัดลดลงเหลือร้อยละ 109 และ 105 ของคอนกรีตควบคุม

จากการสังเกตยังพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด มีค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุมทำให้เกิดการขัดกันขึ้นภายใน และมีพื้นที่ผิวมากขึ้นทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Gemma Rodriguez. 2006 : 158-160)

ตาราง 6 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต

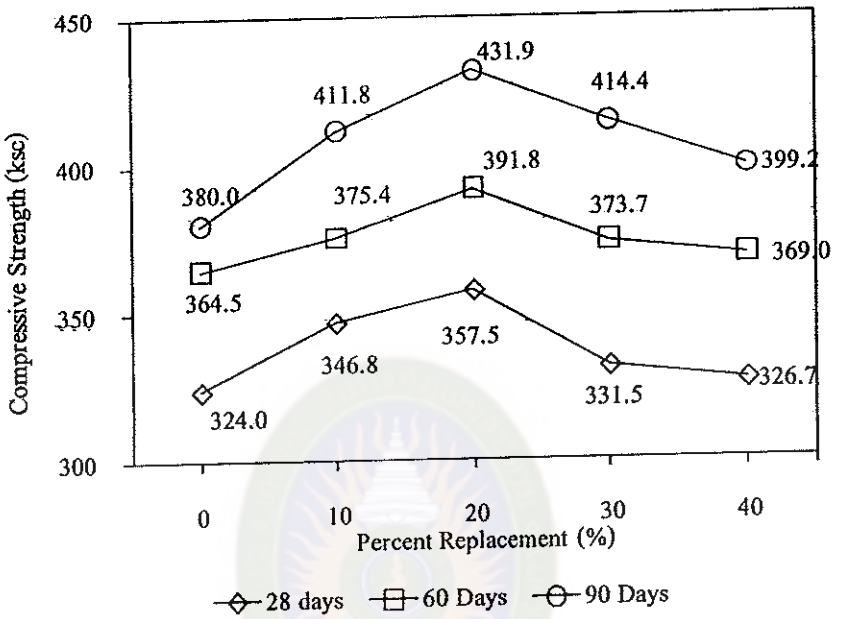
Type of Concrete	Compressive strength (ksc) – Percentage compressive strength (%)						Slump (cm)
	28 days		60 days		90 days		
CC	324.0	*100*	364.5	*100*	380.0	*100*	10
10-GRHA	346.8	*107*	375.4	*103*	411.8	*108*	10.5
20-GRHA	357.5	*110*	391.8	*107*	431.9	*114*	12
30-GRHA	331.5	*102*	373.7	*102*	414.4	*109*	12
40-GRHA	326.7	*101*	369.0	*101*	399.2	*105*	11

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

จากข้อมูลในตาราง 6 นำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด ดังแสดงในภาพประกอบ 15 สามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กของเถ้าแกลบบดละเอียดจะเข้าไปแทรกในช่องว่าง ทำให้ขนาดของโพรงในคอนกรีตลดลง คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น และเนื่องจากอนุภาคที่มีความละเอียดมาก ดังนั้นจึงมีความสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดียิ่งขึ้นส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น (Erdogdu and Turker. 1998 : 1217-1222)

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20 ของทุกอายุการทดสอบ ให้กำลังอัดที่ได้สูงสุด และกำลังอัดเริ่มลดลงเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้า

แกลบบดละเอียดเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 - 40 เนื่องจากปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดมากไป ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลงด้วย

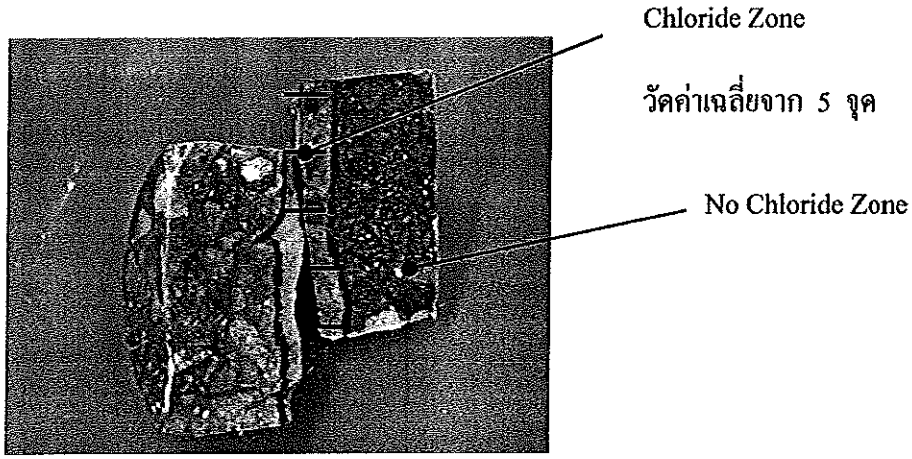


ภาพประกอบ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ผลการดสอบคลอไรด์แบบวิธีการเปรียบเทียบสี

เมื่อทิ้งไว้ในสถานที่จริงจนครบอายุตามการทดสอบ จึงนำตัวอย่างไปผ่าแยกออกและพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) 0.1 N เกิดรูปลักษณะของบริเวณที่มีสีเทา และสีน้ำตาลออกดำ โดยถูกแบ่งแยกขอบเขตอย่างชัดเจน บริเวณที่เป็นสีเทาเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) แสดงว่าบริเวณนี้มีคลอไรด์ ส่วนบริเวณขอบเขตที่เป็นสีน้ำตาลออกดำ บ่งบอกลักษณะว่าเป็นบริเวณที่มีปริมาณคลอไรด์น้อยมากอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจเปรียบเทียบได้ว่าเป็นบริเวณไม่มีคลอไรด์ และทำการวัดระยะเฉลี่ยความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยแบ่งจากหน้าตัดที่ผ่าซีกออกเป็นข้างละ 5 จุดเท่า ๆ กัน ดังแสดงในภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 การกดผ่าครึ่งซีกเพื่อหาระยะการแทรกซึมของคลอไรด์

ผลการทดสอบหาระยะความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีเปรียบเทียบสีของตัวอย่างที่อำภอบรบือ และกันทรวิชัย ดังแสดงในตาราง 7 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ คอนกรีตที่มีระยะเวลาทิ้งไว้นานกว่า จะมีระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ที่มากกว่า เนื่องจากคลอไรด์จะแพร่เข้าในคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระที่ต่ำกว่า และจากการสะสมของความเข้มข้นของคลอไรด์ได้มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

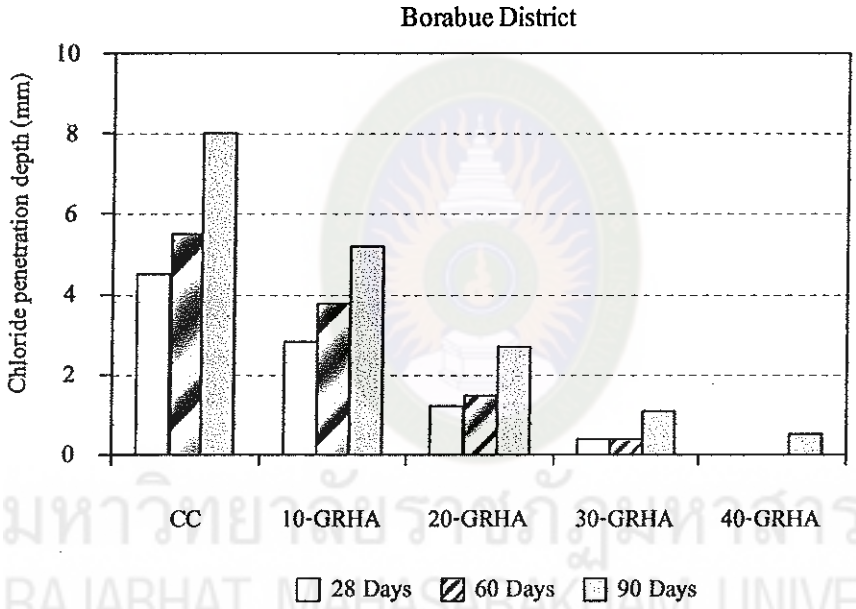
ยังพบว่าคอนกรีตที่ทุกอายุทดสอบ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดร้อยละ 40 ทำให้มีระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำที่สุด

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตาราง 7 ระยะความลึกในการแทรกซึมของคลอไรด์

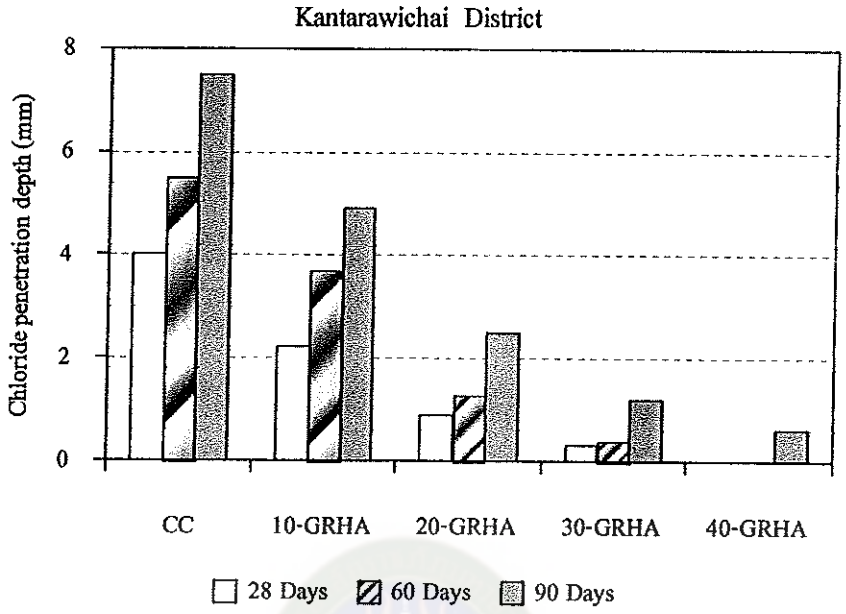
Type of Concrete	Borabue District			Kantarawichai District		
	28 days	60 days	90 days	28 days	60 days	90 days
CC	4.5	5.5	8.0	4.0	5.5	7.5
10-GRHA	2.8	3.8	5.2	2.2	3.7	4.9
20-GRHA	1.2	1.5	2.7	0.9	1.3	2.5
30-GRHA	0.4	0.4	1.1	0.3	0.4	1.2
40-GRHA	-	-	0.5	-	-	0.6

นอกจากนี้ในการทดสอบที่อายุเดียวกัน พบว่าปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละอียดที่สูงขึ้น ทำให้ระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เปลี่ยนรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ไปอยู่ในรูป C-S-H ซึ่งเป็นสารประกอบที่นอกจากเพิ่มกำลังอัดคอนกรีต แล้วยังทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนได้สูง และพบว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดเพื่อต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการใช้วัสดุปอซโซลานอื่น ๆ (ชัยชาญ โชติถนอม. 2546 : 25-51) ดังแสดงในภาพประกอบ 17 - 18



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพประกอบ 17 ระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อำเภอบรบือ



ภาพประกอบ 18 ระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อำเภอกันทรวิชัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY