บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม คุณสมบัติจำเพาะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และวัสดุปอซโซลานได้แก่ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน และมวลรวมหยาบรวมถึงมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ผลการทดสอบ การวิเคราะห์คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ กำลังอัด นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตอีกด้วย

4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ

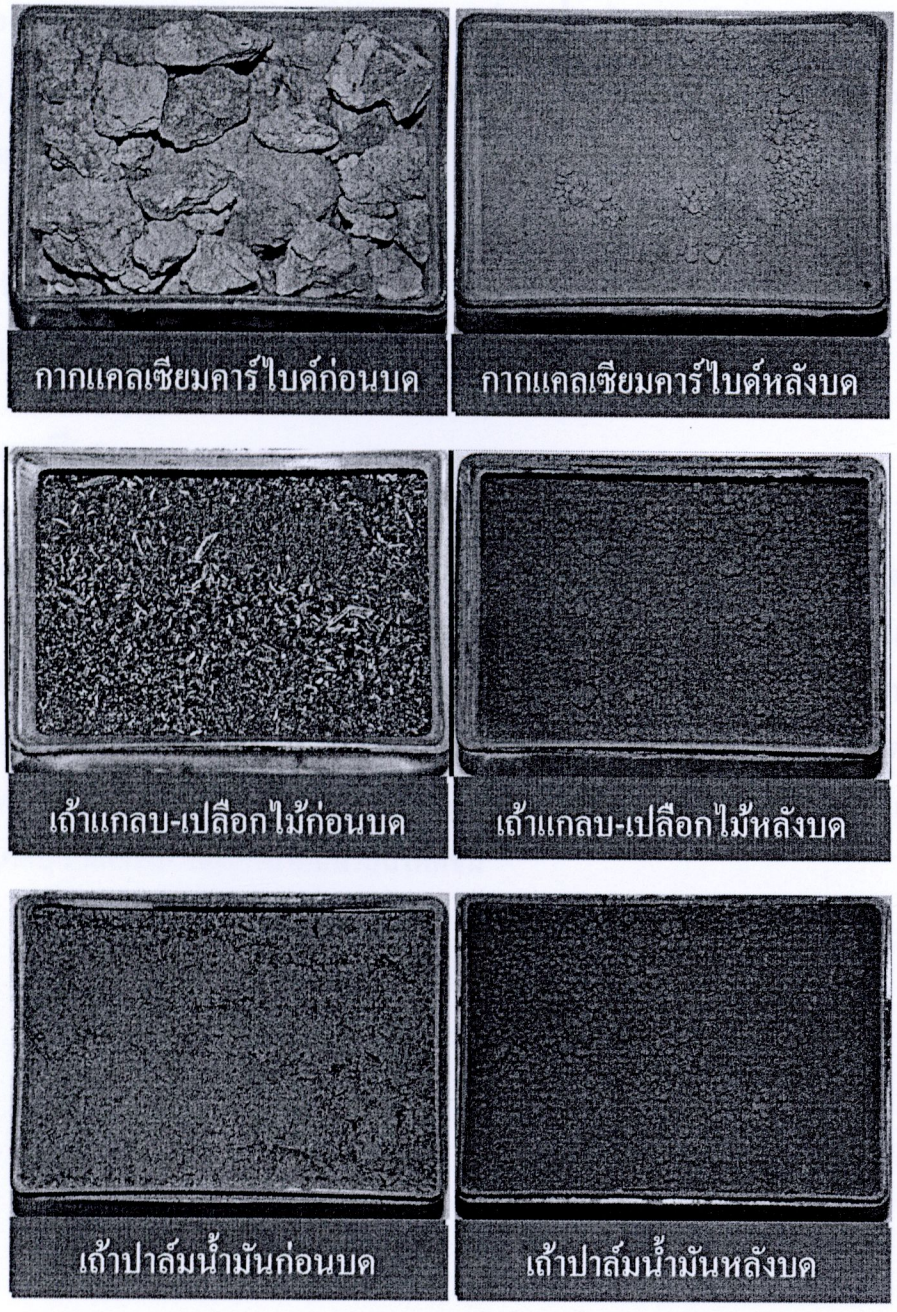
ลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ศึกษา ได้แก่ ลักษณะรูปร่างของอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ และการกระจายตัวของอนุภาค เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดทั้งค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัว และยังส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานเพื่อทำการวิเคราะห์และกำหนดแนวทางในการเลือกใช้วัสดุประสานก่อนทำการหล่อคอนกรีต

4.1.1 ลักษณะทั่วไปและสีของ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ที่ได้จากโรงงานโดยตรงพบว่ามีความชื้นอยู่มากและมีลักษณะเหมือนดินเหนียวจึงสามารถปั้นเป็นก้อนได้ด้วยมือเปล่า สำหรับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ก่อนบดเมื่อตากให้แห้งแล้วมีสีขาวปนเทาจับตัวกันเป็นก้อนขนาดเล็กและใหญ่ปนกัน เมื่อแห้งแล้วจะคงรูปร่างอยู่ในลักษณะเดิมมีลักษณะไม่แน่นอน มีขนาดใหญ่จึงต้องทำการบดให้ละเอียด เมื่อนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปบดทำให้ได้ผงละเอียดเล็กกว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้จากโรงงานโดยตรงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีลักษณะอนุภาคเป็นสีดำ มีสีขาวปนเล็กน้อย สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เมื่อสัมผัสด้วยมือเปล่าจะรู้สึกหยาบ เมื่อนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ไปบดให้ละเอียด พบว่าอนุภาคมีความละเอียดขึ้น และเป็นสีดำเข้มสม่ำเสมอกันทั้งหมด ซึ่งเกิดจากกระบวนการบดทำให้อนุภาคส่วนที่เป็นสีขาวของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้แตกออกปนกัน ส่งผลให้อนุภาคที่เป็นสีดำผสมกันเป็นเนื้อเดียวกัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน มีลักษณะอนุภาคเป็นสีเทาและสีดำปะปนทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนที่เป็นสีดำอาจเป็นเถ้าที่เผาจนเกรียม เมื่อสัมผัสด้วยมือเปล่าจะรู้สึกหยาบแต่หยาบน้อยกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เมื่อนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปบด จะมีความละเอียดเพิ่มขึ้น ส่วนที่เป็นสีดำได้รับการบดพร้อมกับเนื้อเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้สีของเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดมีสีเทาค่อนข้างดำและเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งคล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาของวีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2546)



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

4.1.2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่า มีค่าเท่ากับ 3.15 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของปูนซีเมนต์ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 (Lea, 1970) สำหรับความถ่วงจำเพาะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน แสดงในตารางที่ 4.1 หลังจากการบดกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้วัสดุมีความละเอียดเพิ่มขึ้นและความพรุนของวัสดุลดลง ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Paya และคณะ (1995); Jaturapitakkul and Cheerarot (2003); Makaratat และคณะ (2010); Tangchirapat และ คณะ (2007) ที่พบว่าการบดไม่เพียงลดขนาดอนุภาคของวัสดุแต่ยังสามารถลดความพรุนของวัสดุได้จึงส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยก่อนบด กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.32, 2.03 และ 1.97 ตามลำดับ และหลังบดเท่ากับ 2.47, 2.15 และ 2.33 ตามลำดับ

4.1.3 ความละเอียด

ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบด โดยพิจารณาจากปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดทั้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันส่งผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลง เท่ากับ 4.4, 10.9 และ 10.7 ไมครอน ตามลำดับ และมีอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 ลดลงคือเหลือร้อยละ 2.3, 1.9 และ 1.7 ตามลำดับ เพราะการบดเป็นการเพิ่มความละเอียด ลดความพรุน และเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างให้กับกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันให้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุ

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No. 325 (%)	Median Particle Size, d_{50} (microns)
กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ก่อนบด	2.32	14.9	-
กากแคลเซียมคาร์ไบด์ บดละเอียด	2.47	2.3	4.4
เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ก่อนบด	2.03	68.7	75.2
เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ หลังบดละเอียด	2.15	1.9	10.9
เถ้าปาล์มน้ำมัน ก่อนบด	1.97	41.2	65.6
เถ้าปาล์มน้ำมัน หลังบดละเอียด	2.33	1.7	10.7
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	3.15	-	14.7

4.1.4 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 65.4 ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุอื่นๆ ทำการทดสอบเฉพาะวัสดุที่ทำการบดแล้วเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุด้วยการบดไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งก่อนและหลังบดเปลี่ยนแปลงมากนัก (Paya และคณะ, (1995); สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2538); Tangchirapat และคณะ, (2007) และMakaratat และคณะ, (2010) สำหรับคุณสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ พบว่ามี CaO สูงถึงร้อยละ 56.5 เป็นที่น่าสังเกตว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณ CaO ที่มากกว่าร้อยละ 50 ขององค์ประกอบทางเคมีทั้งหมด ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ สุภิชาติ มาตย์ภูธร (2541) และ ชรินทร์ นมรักษ์ (2544) ซึ่งพบว่ามีค่า CaO เท่ากับร้อยละ 50.8 และ 54.9 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณ LOI (Loss on Ignition) สูงถึงร้อยละ 41.7 เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ LOI มีค่าสูงประมาณ 950 องศาเซลเซียส และกากแคลเซียคาร์ไบด์มีองค์ประกอบของ $Ca(OH)_2$ เป็นส่วนใหญ่ทำให้กากแคลเซียมคาร์ไบด์สลายตัวเป็น CaO และไอน้ำระเหยออกไป (Jaturapitakkul and Roongreung, 2003)

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ส่วนใหญ่คือ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 74.8 ผลรวมของปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 75.8 มีปริมาณ SO_3 เท่ากับร้อยละ 0.5 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 4 แต่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 11.2 ซึ่งสูงกว่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASTM C618 (2009) อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2545; จตุพล ตั้งปกาศิต และคณะ, 2548; Makaratat และคณะ, 2004) แม้ว่าจะมี LOI สูงกว่าที่กำหนดโดย ASTM C618

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน มีค่า SiO_2 เท่ากับร้อยละ 55.5 เมื่อพิจารณาผลรวมขององค์ประกอบ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 70.2 นอกจากนี้มีปริมาณ SO_3 น้อยกว่าร้อยละ 4 คือ เท่ากับร้อยละ 2.3 สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.9 ซึ่งมีค่าไม่เกินที่ ASTM C618 (2008) กำหนดไว้ คือไม่เกินร้อยละ 10 วีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2546) รายงานว่าเถ้าปาล์มน้ำมันนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ดี

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical Composition (%)	CR	RHBA	POFA	Cement Type I
Silicon Dioxide (SiO_2)	4.3	74.8	55.5	20.9
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	0.4	0.2	9.2	4.8
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	0.9	0.8	5.6	3.4
Calcium Oxide (CaO)	56.5	5.9	12.4	65.4
Magnesium Oxide (MgO)	1.7	0.6	4.6	1.3
Sodium Oxide (Na_2O)	0.0	0.2	-	0.3
Potassium Oxide (K_2O)	0.0	2.0	-	0.4
Sulfur Trioxide (SO_3)	0.1	0.5	2.3	2.7
Loss On Ignition (LOI)	41.7	11.2	7.9	1
Tricalcium Silicates (C_3S)	-	-	-	62.9
Dicalcium Silicates (C_2S)	-	-	-	12.5
Tricalcium Aluminate (C_3A)	-	-	-	6.8
Tetracalcium Aluminoferrite (C_4AF)	-	-	-	10.4

4.2 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญ ที่ใช้ในการออกแบบและกำหนดอัตราส่วนผสมของคอนกรีต และยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วรวมทั้งความทนทานของคอนกรีต สำหรับมวลรวมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต โดยคุณสมบัติจำเพาะของมวลรวมดังกล่าวได้แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม

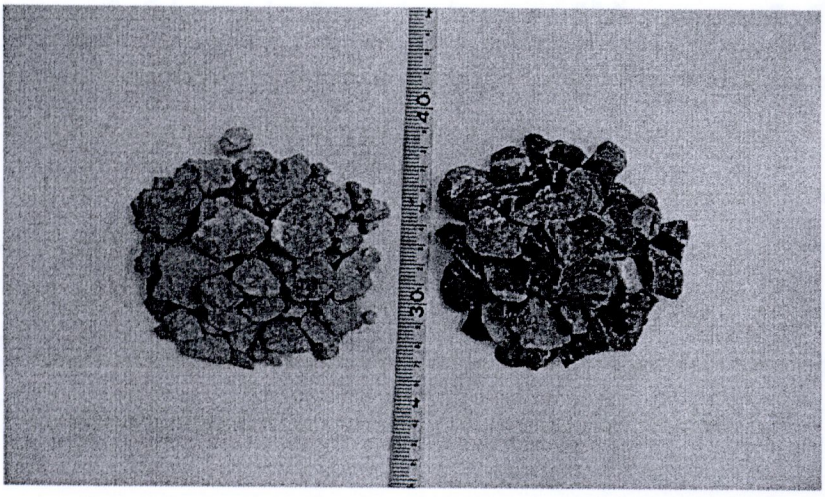
Properties	River Sand	Crushed Limestone	Recycled Fine Aggregate (RF-Agg)	Recycled Coarse Aggregate (RC-Agg)
Fineness Modulus	3.07	6.90	3.41	6.70
Bulk Specific Gravity	2.63	2.73	2.53	2.64
Water Absorption (%)	0.66	0.44	3.67	1.80
Crushing Value (%)	N/A	22.0	N/A	18.8
Abrasion Loss (%)	N/A	18.81	N/A	19.44
Material Finer than 75 μm (Sive No.200)	0.68	0.03	3.70	1.70

หมายเหตุ : N/A = Not Applied

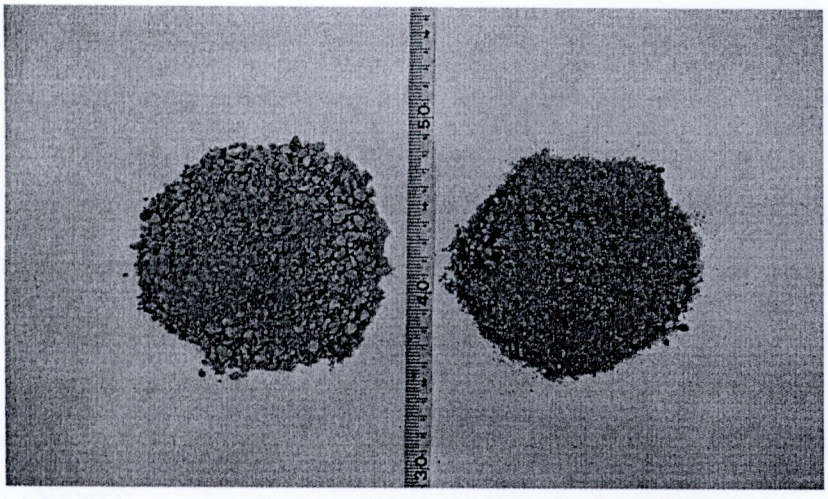
4.2.1 ลักษณะรูปร่างของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 มีลักษณะรูปร่างใกล้เคียงกับหินปูนย่อย คือ มีความเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน ขนาดเฉลี่ยของมวลรวมมีขนาดเล็กกว่าหินปูนย่อย ที่ผิวของมวลรวมส่วนใหญ่มีซีเมนต์เพสต์เกาะติดอยู่ มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและหินปูนย่อยมีค่าเท่ากับ 6.70 และ 6.90 ตามลำดับ

สำหรับมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต มีองค์ประกอบของส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีต ลักษณะมีความเป็นเหลี่ยมเป็นมุมสูง รูปร่างไม่แน่นอน และมีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าทรายแม่น้ำค่อนข้างมากซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและทรายแม่น้ำมีค่าเท่ากับ 3.41 และ 3.07 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ



รูปที่ 4.3 มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและมวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ

4.2.2 ความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวม

มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.64 และ 2.53 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าหินปูนย่อยและทรายแม่น้ำที่มีค่าเท่ากับ 2.73 และ 2.63 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมมีความพรุนและมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ (Chen และคณะ, 2003) ส่งผลให้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hansen และ Narud (1983) และ รักษ์ บูรณสิงห์ (2547) ที่พบว่ามวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.31 และ 2.45 ตามลำดับ ต่อมาปกป้อง รัตนชู (2551) พบว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.49 ขณะที่ สุพัตร์ ขำคล้าย (2552) พบว่ามวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.40 และ 2.48 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันไม่มากนัก เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงกว่างานวิจัยที่ผ่านมาเพียงเล็กน้อย

ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.80 และ 3.67 ซึ่งสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติประมาณ 3 เท่า ส่วนหินปูนย่อยและทรายแม่น้ำมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.44 และ 0.66 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ สุพัตร์ ขำคล้าย มีค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต เท่ากับ 6.46 และ 4.55 ตามลำดับ การที่ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงเนื่องจากมีซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมมีความพรุนสูงทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่งสูงขึ้น สาเหตุที่ค่าการดูดซึมน้ำแตกต่างกันอาจเป็นเพราะมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดของ สุพัตร์ ขำคล้าย นำมาจากการนำก้อนตัวอย่างการทดสอบที่มีกำลังของคอนกรีตอยู่ในช่วงประมาณ 300 กก/ซม^2 และวิธีการกระทุ้งทำให้คอนกรีตเกิดโพรงฟองอากาศมากกว่ามวลรวมที่ได้จากเสาเข็มสปันเนื่องจากเป็นคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงและวิธีการผลิตแบบเหวี่ยงและมีการรีดน้ำออกจากคอนกรีตทำให้เพสต์มีโพรงอากาศน้อยกว่า

4.2.3 ค่าความแข็งแกร่งและความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ

ค่าความแข็งแกร่งของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 1097-2 (British Standards Institution Methods for Determination of Aggregate Crushing Value, 2010) มีค่าความแข็งแกร่งเท่ากับร้อยละ 18.8 ซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแกร่งของหินปูนย่อยที่มีค่าประมาณร้อยละ 22 แสดงให้เห็นว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความแข็งมากกว่าหินปูนย่อยจากธรรมชาติ

ค่าความสึกกร่อนของมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ทดสอบด้วยเครื่องลอสแองเจลิส ตามมาตรฐาน ASTM C131 (American Society for Testing and Materials, 2010) มีค่าการสึกกร่อนเท่ากับร้อยละ 19.44 ซึ่งสูงกว่าค่าการสึกกร่อนของหินปูนย่อยที่มีค่าร้อยละ 18.81 โดยน้ำหนัก

จากค่าความแข็งแกร่งและความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ เห็นได้ชัดว่ามวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีคุณภาพที่ดีกว่าหินปูนย่อยที่ได้จากธรรมชาติ เพราะว่าในการผลิตเข็มสปัน (Spun Pile) ซึ่งใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง (มากกว่า 500 กก/ซม^2) ต้องใช้หินที่มีคุณภาพมากกว่า หินของคอนกรีตที่มีกำลังปกติ ซึ่งโดยทั่วไปคอนกรีตกำลังอัดสูงจะใช้หินที่มีคุณภาพที่ดีในการรับกำลัง (Mindess et al. 2002)

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตเป็นส่วนสำคัญที่สามารถประเมินคุณสมบัติด้านเชิงกลของคอนกรีตได้ โดยผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตได้แสดงในตารางที่ 4.4 ได้แก่ คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด โดยใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต รวมทั้งคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นสารเร่งกำลังในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน 300 กก/ม^3 ซึ่งให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วันเท่ากับ 235, 309, 362, 372 และ 389 กก/ซม^2 ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (CR-RHBA) ที่ไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นสารเร่งกำลังให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 191 และ 239 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (CR-POFA) ที่ไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นสารเร่งกำลังให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 193 และ 247 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มเหมือนคอนกรีตธรรมดาแม้ไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

4.3.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตได้แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าคอนกรีต CR-RHBA ซึ่งไม่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมสามารถให้กำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน เท่ากับ 94, 191, 231, 239 และ 258 กก/ซม^2 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 40, 61, 63, 64 และ 66 ของคอนกรีตธรรมดา (NC300) ตามลำดับ สังเกตได้ว่าคอนกรีต CR-RHBA ให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรดามาก อย่างไรก็ตามคอนกรีต CR-RHBA มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วง 28 วัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ หลังจากนั้นการพัฒนากำลังเป็นไปอย่างช้าๆ จนถึงอายุ 180 วัน คล้ายกับคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ในงานวิจัยของ Makaratat และคณะ (2009) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชรินทร์ นมรักษ์ (2544) ; ศราวุธ เริงฤทธิ์ (2544) ที่พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นวัสดุประสาน มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วง 60 วัน และมีแนวโน้มคงที่เมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 90 วัน เห็นได้ว่าคอนกรีต CR-RHBA ที่อายุ 180 วันสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึง 258 กก/ซม^2 ถึงแม้ว่าไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม^3) พบว่าคอนกรีต CR-RHBA(10) สามารถพัฒนากำลังอัดได้มากกว่าคอนกรีต CR-RHBA โดยให้กำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน เท่ากับ 138, 269, 318, 341 และ 379 กก/ซม^2 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละเท่ากับ 58, 87, 88, 91 และ 97 ของคอนกรีตธรรมดา NC(300) ตามลำดับ โดยเฉพาะกำลังอัดที่อายุ 180 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงถึงร้อยละ 97 เกือบเท่ากับคอนกรีตธรรมดา NC(300) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้นคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นตามไปด้วย เช่น คอนกรีต CR-RHBA(20) (ปูนซีเมนต์ 90 กก/ซม^2) ให้กำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน เท่ากับ 206, 344, 382, 409 และ 426 กก/ซม^2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุทธินันท์ แอเดียว (2553) การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นการเพิ่ม C_3S และ C_2S ตลอดจน $Ca(OH)_2$ เพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งพบว่ามีค่าสูงขึ้นตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดเป็นวัสดุประสาน เป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดที่มีปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และการใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีตเดิมยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด สามารถให้ค่ากำลังของคอนกรีตสูงสุดที่อายุ 180 วัน เท่ากับ 426 กก/ซม^2 แสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำทั้งหมดไม่ส่งผลกระทบต่อการรับกำลังอัดของคอนกรีตมากนัก ซึ่งสังเกตได้จากค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมแทนที่หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา NC(300) หรือคิดเป็นร้อยละ 109 ของคอนกรีตธรรมดาเมื่อคอนกรีตมีอายุ 180 วัน

4.3.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต

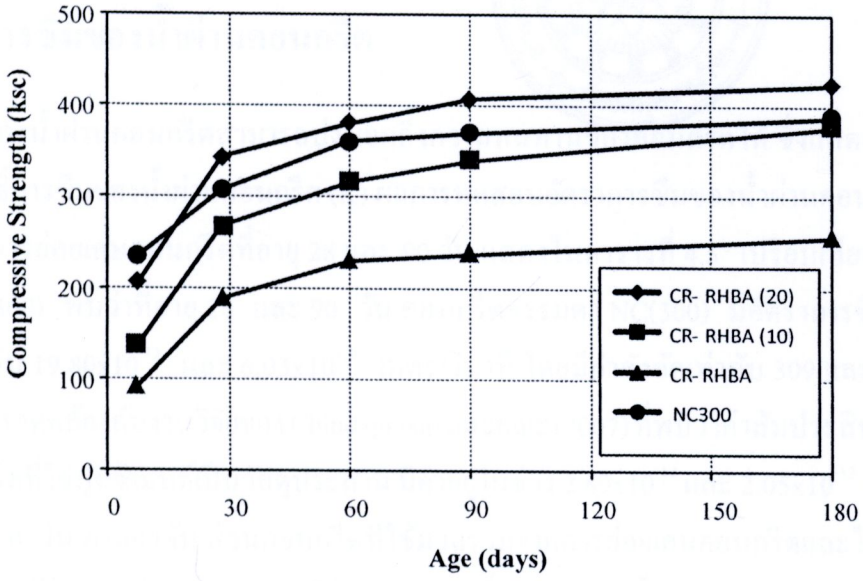
ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีต CR-POFA มีการพัฒนากำลังอัดคล้ายกับคอนกรีต CR-RHBA คือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 28 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 193 กก/ซม^2 จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ถึง 258 กก/ซม^2 ที่อายุ 180 วัน และเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้นทำให้กำลังอัดเพิ่มมากขึ้น คอนกรีต CR-POFA(10) (ใช้ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม^3) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 292, 334 และ 358 กก/ซม^2 ที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 79, 75 และ 76 ของคอนกรีตธรรมดา ส่วนคอนกรีต CR-POFA(20) (ใช้ปูนซีเมนต์ 90 กก/ม^3) มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน เท่ากับ 292, 334 และ 358 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 94, 92 และ 92 ตามลำดับของคอนกรีต NC(300) ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ 300 กก/ม^3

เป็นที่น่าสังเกตว่าคอนกรีต CR-RHBA และCR-POFA มีการพัฒนากำลังอัดคล้ายกันในช่วงอายุต้น แต่อายุปลายการพัฒนากำลังอัดเป็นไปอย่างช้าๆ เมื่อดูจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและอายุของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 และเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (NC300) เห็นได้ชัดว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตแตกต่างกันมาก ส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง CR-RHBA(10), CR-RHBA(20), CR-POFA(10) และCR-POFA(20) เห็นได้ชัดเจนว่าการทำปฏิกิริยาของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ดีกว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา NC(300) ส่วนคอนกรีต CR-RHBA(20) ให้กำลังอัด เท่ากับ 344 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 111 ที่อายุ 28 วันของคอนกรีตธรรมดา และที่อายุ 180 วัน คอนกรีตมีค่ากำลังอัด

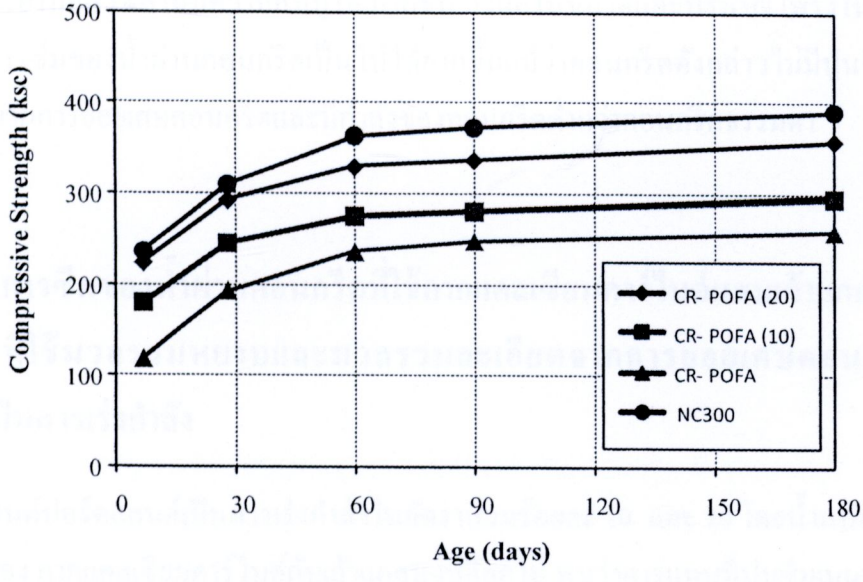
เท่ากับ 426 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 109 ของคอนกรีตธรรมดา แสดงว่าส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังเพียง 90 กก/ม^3 มีการพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้ปูนซีเมนต์ 300 กก/ม^3 และใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่าถึง 3.3 เท่า

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

Concrete	Compressive Strength (ksc)-***Normalized Compressive Strength (%)***				
	7 days	28 days	60 days	90 days	180 days
CR-RHBA	94-***(40)***	191-***(61)***	231-***(63)***	239-***(64)***	258-***(66)***
CR-RHBA(10)	138-***(58)***	269-***(87)***	318-***(88)***	341-***(91)***	379-***(97)***
CR-RHBA(20)	206-***(87)***	344-***(111)***	382-***(105)***	409-***(109)***	426-***(109)***
CR-POFA	119-***(50)***	193-***(62)***	235-***(64)***	247-***(66)***	258-***(66)***
CR-POFA(10)	179-***(75)***	245-***(79)***	274-***(75)***	280-***(75)***	294-***(76)***
CR-POFA(20)	223-***(94)***	292-***(94)***	329-***(90)***	334-***(92)***	358-***(92)***
NC(300)	235-***(100)***	309-***(100)***	362-***(100)***	372-***(100)***	389-***(100)***



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดเป็นวัสดุประสาน ที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดเป็นวัสดุประสาน ที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

4.4 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสามารถบ่งบอกถึงความทนทานของคอนกรีตได้ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (K) ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน แสดงในตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา NC(300) พบว่าที่อายุ 28 และ 90 วัน คอนกรีตธรรมดา NC(300) มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 19.80×10^{-13} และ 6.03×10^{-13} เมตร/วินาที โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 309 และ 372 กก/ซม^2 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ (2007) ที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน มีค่าอยู่ในช่วง 2.89×10^{-12} และ 2.05×10^{-12} เมตร/วินาที ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตและไม่มีปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังคือคอนกรีต CR-POFA มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 1.648×10^{-12} เมตร/วินาที ที่อายุ 28 วัน ส่วนคอนกรีต CR-RHBA มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเร็วเกินไปจนไม่สามารถวัดค่าได้ เมื่ออายุ 90 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CR-RHBA และ CR-POFA มีค่าลดลงเท่ากับ 2.16×10^{-13} และ 7.10×10^{-13} เมตร/วินาที ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต CR-RHBA และ CR-POFA มีค่าต่ำลงเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดและปริมาณโพรงในคอนกรีตมีค่าลดลง ทำให้การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเป็นไปได้ยากขึ้นแม้ว่าคอนกรีตดังกล่าวไม่มีปูนซีเมนต์และใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและมีกำลังของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา

4.4.1 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง

เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมของ กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ พบว่าการแทนที่ปูนซีมเมนต์มากขึ้นทำให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น คอนกรีต CR-RHBA(10) (ใช้ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม^3) มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และ 90 วันเท่ากับ 2.82×10^{-13} และ 1.76×10^{-13} เมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.14 และ 0.29 เท่าของคอนกรีตธรรมดา โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 269 และ 341 กก/ม^2 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต CR-RHBA(20) (ปูนซีเมนต์ 90 กก/ม^3) มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ

28 วัน และ 90 วันเท่ากับ 1.90×10^{-13} และ 1.10×10^{-13} เมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.09 และ 0.18 เท่าของคอนกรีตธรรมดา NC(300) โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 344 และ 409 กก/ซม^2 ตามลำดับ

4.4.2 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลัง

สำหรับคอนกรีต CR-POFA(10) และ CR-POFA(20) มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเป็นไปในทิศทางเดียวกับคอนกรีต CR-RHBA คือเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น สำหรับคอนกรีต CR-POFA(10) (ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม^3) มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ 6.24×10^{-13} เมตร/วินาที และมีค่าลดต่ำลงเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 1.21×10^{-13} เมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.32 และ 0.20 เท่าของคอนกรีตธรรมดา โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 245 และ 280 กก/ซม^2 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต CR-POFA(20) ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 3.10×10^{-13} เมตร/วินาที และที่อายุ 90 วัน มีค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดต่ำลง เท่ากับ 2.16×10^{-13} เมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.15 และ 0.36 เท่าของคอนกรีตธรรมดา โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 292 และ 334 กก/ซม^2 ตามลำดับ

ผลการทดสอบเห็นได้ชัดว่าคอนกรีต CR-RHBA และ CR-POFA ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดให้มีความละเอียดสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลให้การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดต่ำลงด้วย และเมื่อใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในปริมาณมากขึ้นทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดต่ำลง ถึงแม้ว่าจะใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตก็ตาม ซึ่งสอดคลองกับงานวิจัยของ กิตติพงษ์ อำนาจเหนือ (2552) ที่ศึกษาการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานในคอนกรีตพบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดต่ำลง

ตารางที่ 4.5 ค่ากำลังอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

Sample	Compressive Strength (ksc)		Coefficient of Water Permeability ($Kx10^{-13}$),m/sec (K/K_{NC})	
	28 days	90 days	28 days	90 days
CR-RHBA	191	239	-	2.16 ***(0.36)***
CR-RHBA (10)	269	341	2.82 ***(0.14)***	1.76 ***(0.29)***
CR-RHBA (20)	344	409	1.90 ***(0.09)***	1.10 ***(0.18)***
CR-POFA	193	247	16.48 ***(0.83)***	7.10 ***(1.18)***
CR-POFA (10)	245	280	6.24 ***(0.32)***	1.21 ***(0.20)***
CR-POFA (20)	292	334	3.10 ***(0.15)***	2.16 ***(0.36)***
NC (300)	309	372	19.80 ***(1.00)***	6.03 ***(1.00)***

4.5 การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต ซึ่งแสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต (D_{nssm}) มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาทีและแสดงค่าร้อยละของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ใช้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังอัตราร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของ วัสดุประสาน ทำการทดสอบ ที่อายุ 28 และ 90 วัน โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วันเท่ากับ $27.14x10^{-12}$ และ $7.03x10^{-12}$ ตารางเมตร/วินาที และมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 309 และ 372 กก/ซม^2 ตามลำดับ

4.5.1 อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

ผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตพบว่าคอนกรีต CR-RHBA ที่ไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเร่งกำลัง มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 2.18×10^{-12} ตารางเมตร/วินาที และที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 0.113×10^{-12} ตารางเมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.08 และ 0.02 เท่าของคอนกรีตธรรมดาตามลำดับ ส่วนคอนกรีต CR-RHBA(10) (ใช้ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม^3) มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ 2.15×10^{-12} ตารางเมตร/วินาที และที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 0.307×10^{-12} ตารางเมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.08 และ 0.04 เท่าของคอนกรีตธรรมดา ตามลำดับ สำหรับคอนกรีต CR-RHBA (20) (ปูนซีเมนต์ 90 กก/ม^3) มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ 1.84×10^{-12} ตารางเมตร/วินาที และที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 0.256×10^{-12} ตารางเมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.07 และ 0.04 เท่าของคอนกรีตธรรมดาตามลำดับ

จากผลการทดสอบเป็นที่น่าสังเกตว่าคอนกรีต CR-RHBA, CR-RHBA(10) และ CR-RHBA(20) มีการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตไม่แตกต่างกันมากนัก และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา NC(300) ทั้งนี้เป็นเพราะว่า คอนกรีต CR-RHBA, CR-RHBA(10) และ CR-RHBA(20) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 ซึ่งน้อยกว่า NC(300) ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.70 จากผลการทดสอบเห็นได้ชัดเจนว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต และใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (CR-RHBA(20)) มีคุณสมบัติเบื้องต้นได้แก่ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 292 กก/ซม^2 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 3.10×10^{-13} เมตร/วินาที และค่าการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 1.84×10^{-12} ตารางเมตร/วินาที จากการทดสอบนี้เพียงพอที่จะชี้ให้เห็นได้ว่าคอนกรีต CR-RHBA(20) สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้

4.5.2 อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

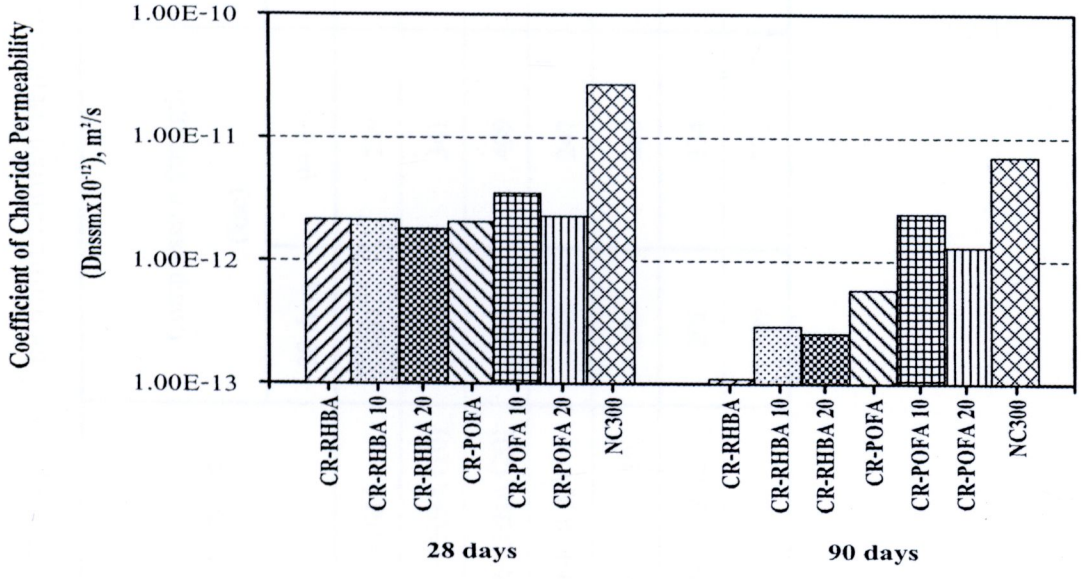
ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีต CR-POFA ที่ไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ $2.10x10^{-12}$ ตารางเมตร/วินาที และที่อายุ 90 วัน เท่ากับ $0.581x10^{-12}$ ตารางเมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.08 และ 0.08 เท่าของคอนกรีตธรรมดา ตามลำดับ สำหรับคอนกรีต CR-POFA(10) (ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม^3) มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ $3.58x10^{-12}$ ตารางเมตร/วินาที และที่อายุ 90 วัน เท่ากับ $2.38x10^{-12}$ ตารางเมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.13 และ 0.33 เท่าของคอนกรีตธรรมดา ตามลำดับ และคอนกรีต CR-POFA(20) (ใช้ปูนซีเมนต์ 90 กก/ม^3) มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ $2.31x10^{-12}$ ตารางเมตร/วินาที และที่อายุ 90 วัน เท่ากับ $1.24x10^{-12}$ ตารางเมตร/วินาที หรือคิดเป็น 0.09 และ 0.17 เท่าของคอนกรีตธรรมดา ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่ากำลังอัดและค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

Concrete	Compressive Strength (ksc)		Coefficient of Chloride Permeability ($D_{nssm}x10^{-12}$),m^2/sec (D_{nssm}/D_{NC})	
	28 days	90 days	28 days	90 days
CR-RHBA	191	239	2.18 ***(0.08)***	0.113 ***(0.02)***
CR-RHBA (10)	269	341	2.15 ***(0.08)***	0.307 ***(0.04)***
CR-RHBA (20)	344	409	1.84 ***(0.07)***	0.256 ***(0.04)***
CR-POFA	193	247	2.10 ***(0.08)***	0.581 ***(0.08)***
CR-POFA (10)	245	280	3.58 ***(0.13)***	2.380 ***(0.33)***
CR-POFA (20)	292	334	2.31 ***(0.09)***	1.240 ***(0.17)***
NC(300)	309	372	27.14 ***(1.00)***	7.03 ***(1.00)***

จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต CR-RHBA และCR-POFA ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา NC(300) ที่มีค่ากำลังอัดมากกว่า เห็นได้ชัดว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ถึงแม้ว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าก็ตาม ส่วนคอนกรีตที่มีการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังคือคอนกรีต CR-RHBA(10), CR-RHBA(20), CR-POFA(10) และCR-POFA(20) (ใช้ปูนซีเมนต์ 45 และ 90 กก/ม^3) มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงและสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา NC(300) แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา NC(300) แม้ว่าใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาถึง 6.7 และ 3.3 เท่า

รูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์และอายุของคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสม จากรูปแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีคุณสมบัติต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และคอนกรีตธรรมดา ทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สรภพ ก้านบัวแก้ว (2552) ที่ศึกษาเรื่องการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู้คอนกรีตได้ดีกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน และตารางที่ 4.7 แสดงค่ากำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและอายุของคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสม

ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต

Concrete	Compressive Strength (ksc)		Coefficient of Water Permeability ($Kx10^{-13}$),m/sec (K/K_{NC})		Coefficient of Chloride Permeability ($D_{nssm}x10^{-12}$),m^2/sec (D_{nssm}/D_{NC})	
	28 days	90 days	28 days	90 days	28 days	90 days
CR-RHBA	191	239	-	2.16 ***(0.36)***	2.18 ***(0.08)***	0.113 ***(0.02)***
CR-RHBA (10)	269	341	2.82 ***(0.14)***	1.76 ***(0.29)***	2.15 ***(0.08)***	0.307 ***(0.04)***
CR-RHBA (20)	344	409	1.90 ***(0.09)***	1.10 ***(0.18)***	1.84 ***(0.07)***	0.256 ***(0.04)***
CR-POFA	193	247	16.48 ***(0.83)***	7.10 ***(1.18)***	2.10 ***(0.08)***	0.581 ***(0.08)***
CR-POFA (10)	245	280	6.24 ***(0.32)***	1.21 ***(0.20)***	3.58 ***(0.13)***	2.380 ***(0.33)***
CR-POFA (20)	292	334	3.10 ***(0.15)***	2.16 ***(0.36)***	2.31 ***(0.09)***	1.240 ***(0.17)***
NC(300)	309	372	19.80 ***(1.00)***	6.03 ***(1.00)***	27.14 ***(1.00)***	7.03 ***(1.00)***