

ผลกระทบของความละเอียดของวัสดุ ต่อค่าการอัดตัวและปฏิกิริยา ปอซโซลานของแรงดึงคอนกรีต

Effect of the Fineness of Material on Packing Effect and Pozzolanic Reaction of Concrete Tensile

ชยณัฐ หุตะจิตต์¹ และ จตุพล ตั้งปากาศิต²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดของวัสดุต่อค่าการอัดตัวและปฏิกิริยาปอซโซลานของแรงดึงคอนกรีต โดยใช้วัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ 3 ชนิด คือตะกอนประปาทรายแม่น้ำ และเถ้าถ่านหิน โดยนำมาบดให้มี 3 ขนาด คือมีขนาดน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ตามลำดับ นำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และทดสอบแรงดึงที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยวิธีทดสอบแรงดึงโดยตรง ผลการทดลองพบว่าขนาดของอนุภาคที่ต่างกัน 3 ขนาด โดยที่ขนาดเล็กที่สุดจะให้ค่าแรงดึงสูงกว่าขนาดที่ใหญ่กว่า เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละที่เท่ากันแต่มีขนาดของความละเอียดแตกต่างกัน ทำให้ค่าแรงดึงที่เกิดจากการที่อนุภาคขนาดเล็กจะแทรกอยู่ในช่องว่างของมอร์ตาร์ มีการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ค่าแรงดึงที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กมีค่ามากกว่าค่าแรงดึงที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่ สำหรับการใส่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงสูงกว่าการใส่เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ และการแทนที่มากขึ้นมีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานที่ลดลง เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดน้อยลง มีผลทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงด้วย ส่งผลให้ค่าแรงดึงจากปฏิกิริยาปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าร้อยละ 20

คำสำคัญ: การอัดตัวของอนุภาค ปฏิกิริยาปอซโซลาน แรงดึงโดยตรง

¹ นักศึกษาปริญญาโทวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

The results showed that the particle size of 3 different sizes, where smallest size to the tension of the concrete directly above the larger size. Due to the replacement of cement. Or sludg Percent in the same size but with different resolution. Cause tension caused by the small particles to be inserted in the gap of Mortar. A more appropriate arrangement of particles larger than. Resulting tension caused by small particles is greater than the tension caused by larger particles. And the use of fly ash with hibiscus smaller than the result of the pozzolanic reaction force of the concrete directly above the fly ash bigger. And replace more and more the result of pozzolanic reaction is reduced. Due to the replacement of cement with fly ash increased. Reduce the amount of cement The results showed that the reaction Hydration and pozzolanic reaction reduced. Tension resulting from reactive pozzolan cement replacement of 10 percent is greater than 20 percent. Reduce the amount of cement The results showed that the reaction Hydration and pozzolanic reaction reduced. As a result, the difference between the tension of concrete using fly ash, crushed concrete, cement, sand, crushed to replace 10 percent greater than the difference between the fly ash to replace cement grinding mill with 20 percent sand.

Keywords: Packing Effect, Pozzolanic Reaction, Direct Tensile

1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมีผลทำให้คอนกรีตมีต้นทุนที่ถูกลง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติดีขึ้น ซึ่งถ้าถ่านหินเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตเป็นจำนวนมาก เนื่องจาก

มีปริมาณมากและมีผลดีต่อการนำมาใช้ในคอนกรีต

ตะกอนประปาก็เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้มาจากขบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งก็เป็นปัญหาในการกำจัด โดยทางการประปาต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนทิ้งและหาสถานที่ทิ้ง แต่จากการที่ตะกอนน้ำประปามีลักษณะของอนุภาคที่ละเอียดก็น่าจะนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ โดยใช้เป็นตัวเติมแทรกที่ส่งผลต่อกำลังอัดที่ดีขึ้น [1-3]

เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมวัสดุเหลือทิ้ง จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือด้านปฏิกิริยาเคมีที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน และด้านกายภาพซึ่งก็คือการอัดตัวของอนุภาคที่เกิดจากการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของอนุภาควัสดุที่มีขนาดเล็กและแทรกอยู่ในช่องว่างของมอร์ตาร์ การจัดเรียงตัวของอนุภาคที่เหมาะสมนี้มีผลทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น เป็นผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี ดังเช่นในกรณีปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปฏิกิริยาปอซโซลาน [4]

ซึ่งกำลังอัดและแรงดึงของคอนกรีตก็เป็นส่วนสำคัญโดยเฉพาะแรงดึง ที่ผ่านมามีผลงานวิจัยน้อยมากเมื่อเทียบกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับแรงอัด แต่จากงานวิจัยยังไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้วัสดุละเอียดต่อคุณสมบัติในการรับแรงดึงของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการนำตะกอนประปามาใช้ในคอนกรีต โดยทำการเปรียบเทียบโดยการทดสอบค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตกับการใช้ทรายแม่น้ำบดที่เป็นวัสดุเฉื่อย และเถ้าถ่านหินที่เป็นวัสดุปอซโซลาน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของมวลละเอียดวัสดุ ตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าถ่านหิน แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตที่ใช้ตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน

2.3 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของขนาดอนุภาคที่ต่างกันต่อการอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลานของแรงดึงโดยตรงในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าถ่านหินอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3. การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, หินขนาด $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$ นิ้ว, ทรายแม่น้ำล้างสะอาด, ตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ และเถ้าถ่านหินจากโรงผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้สำหรับการหล่อคอนกรีตตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงดึงโดยตรง มีรายละเอียดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตตัวอย่าง

ตัวอย่าง	C (Kg.)	FA (Kg.)	SP (Kg.)	Sl (Kg.)
C	327.0	-	-	-
C-5-FA10	294.3	32.7	-	-
C-13.5-FA10		32.7	-	-
C-22.5-FA10		32.7	-	-
C-5-SP10		-	32.7	-
C-13.5-SP10		-	32.7	-
C-22.5-SP10		-	32.7	-
C-5-Sl 10		-	-	32.7
C-13.5-Sl 10		-	-	32.7
C-22.5-Sl 10		-	-	32.7
C-5-FA20	261.6	65.4	-	-
C-13.5-FA20		65.4	-	-
C-22.5-FA20		65.4	-	-
C-5-SP20		-	65.4	-
C-13.5-SP20		-	65.4	-
C-22.5-SP20		-	65.4	-
C-5-Sl 20		-	-	65.4
C-13.5-Sl 20		-	-	65.4
C-22.5-Sl 20		-	-	65.4
Rock	1134.0	Kg.	W/C	0.6
Sand	785.0	Kg.	Slump (cm.)	7 ± 2.5
Water	180.0	Kg.		

สัญลักษณ์

C หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

FA หมายถึง เถ้าถ่านหิน

SP หมายถึง ทราบด

Sl หมายถึง ตะกอนประปา

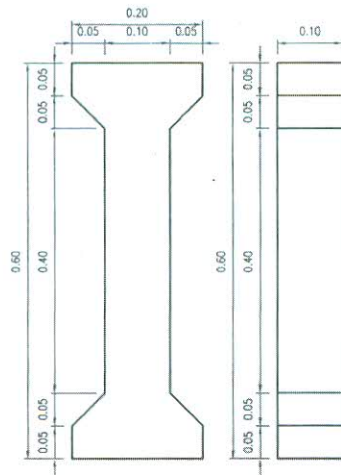
5, 13.5, 22.5 หมายถึง ขนาดน้ำหนักร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของทรายละเอียด 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 10, 20 หมายถึง ปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

นำตะกอนประปา, ทรายแม่น้ำ และ เถ้าถ่านหิน มาทำการบดให้มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดคือมีขนาดน้ำหนักร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ตามลำดับ โดยที่น้ำหนักร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนน้ำหนักร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตะกอนประปา 325 ร้อยละ 22.5 เป็นค่าน้ำหนักของตะกอนประปาของเถ้าถ่านหินที่มาจากโรงผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง หลังจากที่ได้ขนาดแล้ว มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แยกเป็นแต่ละขนาดตามอัตราส่วน ทำการผสมและหล่อคอนกรีตตัวอย่างตามตารางที่ 1 ทำการถอดแบบออกเมื่อคอนกรีตอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มด้วยน้ำ ทำการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตตัวอย่างเมื่ออายุครบ 7 วัน, 28 วัน และ 60 วัน

3.1 วิธีการทดสอบ

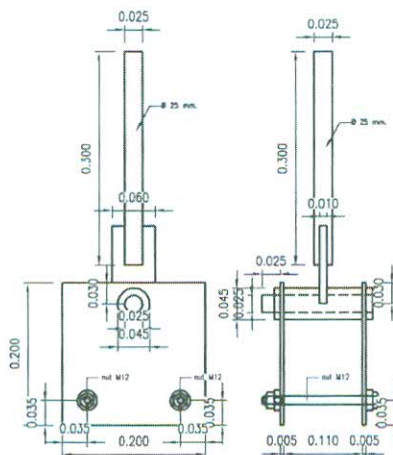
3.1.1 นำตัวอย่างที่อายุครบกำหนดตามวันทดสอบมาผึ่งให้แห้ง จากนั้นทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักจนได้ค่าไว้ ก่อนทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงโดยตรง

3.1.2 รูปแบบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1

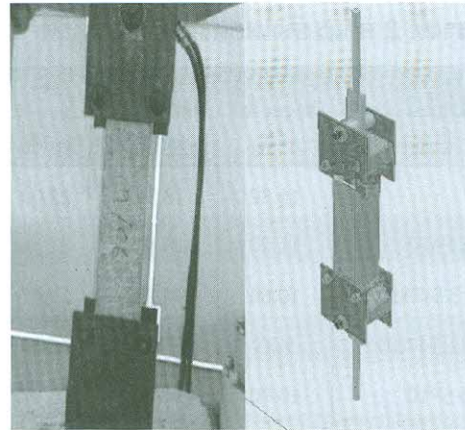


รูปที่ 1 รูปแบบของตัวอย่างคอนกรีต

3.1.3 รูปหัวยึดตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจุดยึดบนและล่างเป็นแบบจุดยึดหมุน และการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 รูปหัวยึดตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3 รูปการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

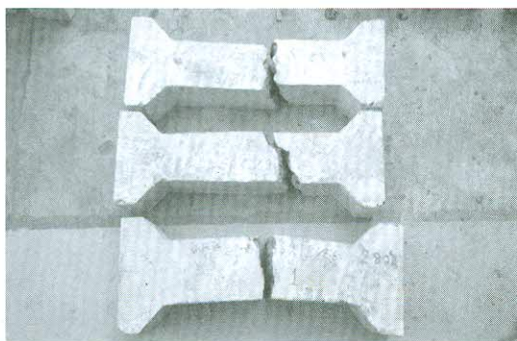
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ค่าการทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีต

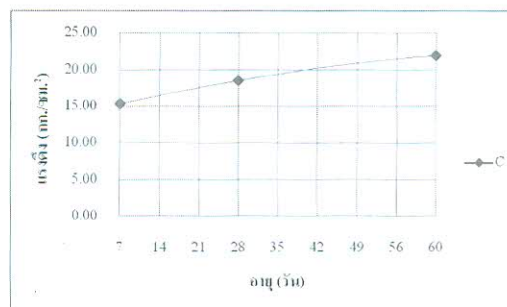
จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปตัวไอ เมื่อทำการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4 และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ค่าแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีต C มีค่าเท่ากับ 15.32 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วัน, เพิ่มขึ้นเป็น 18.59 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 22.04 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 2 ค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

ค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (กก./ซม. ²)			
ตัวอย่าง	7 วัน	28 วัน	60 วัน
C	15.32	18.59	22.04
C-5-FA10	11.20	16.42	21.32
C-13.5-FA10	10.64	14.25	19.47
C-22.5-FA10	9.85	13.85	18.34
C-5-SP10	10.70	14.98	18.67
C-13.5-SP10	10.34	13.20	16.98
C-22.5-SP10	9.83	13.06	16.04
C-5-SL 10	9.15	12.81	14.76
C-13.5-SL 10	8.64	12.34	14.08
C-22.5-SL 10	8.55	11.66	13.74
C-5-FA20	11.02	15.09	18.91
C-13.5-FA20	10.31	13.80	17.41
C-22.5-FA20	9.50	12.78	15.59
C-5-SP20	10.85	14.51	17.99
C-13.5-SP20	10.16	13.30	16.55
C-22.5-SP20	9.34	12.36	14.78
C-5-SL 20	9.45	11.49	13.91
C-13.5-SL 20	8.81	10.51	13.13
C-22.5-SL 20	8.68	10.17	11.97



รูปที่ 4 รูปคอนกรีตตัวอย่างที่ทดสอบแล้ว

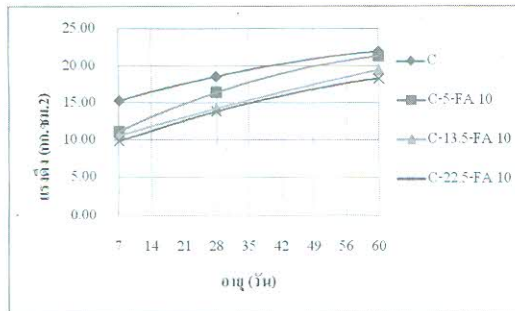


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต

จะเห็นได้ว่าค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตมีการเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น

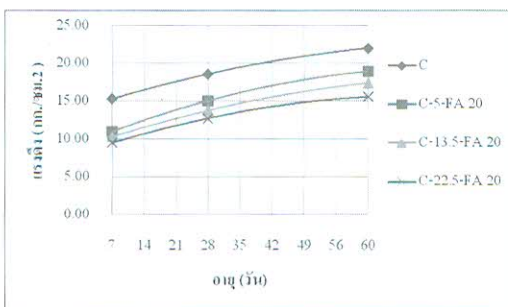
ผลของการใช้เถ้าถ่านหินที่มีขนาดน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของตัวอย่าง C-5-FA10, C-13.5-FA10 และ C-22.5-FA10 ตามลำดับ โดยเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 พบว่าค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินขนาดเล็กที่สุด C-5-FA10 มีค่าแรงดึงมากที่สุด และการใช้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ที่สุด C-22.5-FA10 จะให้ค่าแรงดึงน้อยที่สุด

แต่เนื่องจากค่าแรงดึงของคอนกรีตจะมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัด ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากำลังอัดจะขึ้นอยู่กับขนาดของเถ้าถ่านหินที่ใช้ [4-5] โดยเถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ซึ่งหมายความว่าค่าแรงดึงของคอนกรีตก็จะมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (เถ้าถ่านหินแทนที่ร้อยละ 10)

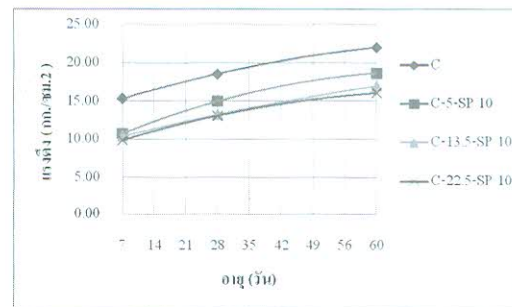
สำหรับตัวอย่าง C-5-FA20, C-13.5-FA20 และ C-22.5-FA20 ที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะพบว่ามิติทางไปทางเดียวกับตัวอย่าง C-5-FA10, C-13.5-FA10 และ C-22.5-FA10 โดยจะมีค่าแรงดึงมากขึ้นตามขนาดของเถ้าถ่านหินที่เล็กลง แต่จะมีแรงดึงที่น้อยกว่าตัวอย่าง C-5-FA10, C-13.5-FA10 และ C-22.5-FA10 ที่มีขนาดน้ำหนักร้อยละ 10 ตามตารางเบอร์ 325 เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (เถ้าถ่านหินแทนที่ร้อยละ 20)

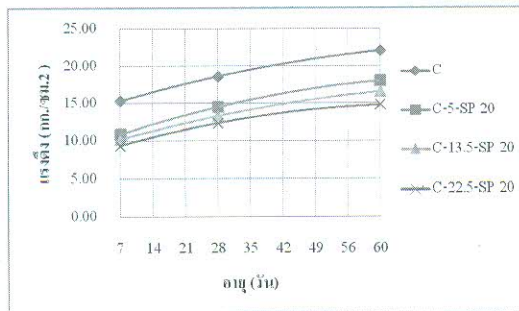
ผลของการใช้ทรายบดที่มีขนาดน้ำหนักร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของตัวอย่าง C-5-SP10, C-13.5-SP10 และ C-22.5-SP10 ตามลำดับ โดยเมื่อ

ใช้การแทนที่ทรายบดในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่าง C-5-SP10, C-13.5-SP10 และ C-22.5-SP10 พบว่าที่อายุ 7 วัน ค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทรายบดขนาดเล็กที่สุด C-5-SP10 มีค่าแรงดึงมากที่สุด และการใช้ทรายบดขนาดใหญ่ C-22.5-SP10 จะให้ค่าแรงดึงน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 8



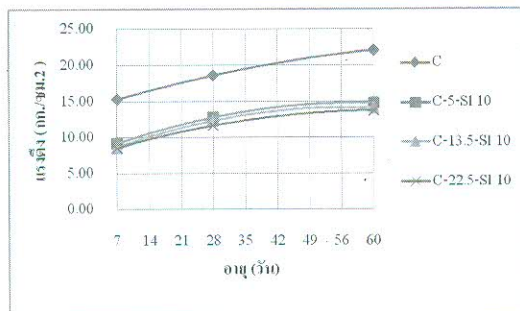
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ทรายบดแทนที่ร้อยละ 10)

และสำหรับตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP20, C-13.5-SP20 และ C-22.5-SP20 ที่ใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะพบว่าที่อายุ 7 วันค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง C-5-SP10, C-13.5-SP10 และ C-22.5-SP10 คือมีค่าประมาณ 10 กก./ชม.² แต่ที่อายุ 60 วันค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP20 มีค่าเท่ากับ 17.99 กก./ชม.², C-13.5-SP20 มีค่าเท่ากับ 16.55 กก./ชม.² และ C-22.5-SP20 มีค่าเท่ากับ 14.78 กก./ชม.² จะมีค่าแรงดึงน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP10 มีค่าเท่ากับ 18.34 กก./ชม.², C-13.5-SP10 มีค่าเท่ากับ 16.98 กก./ชม.² และ C-22.5-SP10 มีค่าเท่ากับ 16.04 กก./ชม.² ดังแสดงในรูปที่ 9



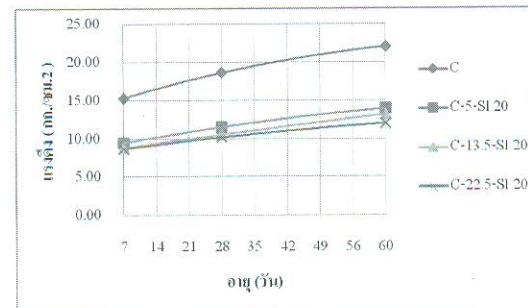
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดิ่งกับอายุคอนกรีต (ทรายบดแทนที่ร้อยละ 20)

ผลของการใช้ตะกอนประปาบดที่มีขนาดน้ำหนักร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของตัวอย่าง C-5-SL 10, C-13.5-SL 10 และ C-22.5-SL 10 ตามลำดับ โดยเมื่อใช้การแทนที่ตะกอนประปาบดในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่าง C-5-SL 10, C-13.5-SL 10 และ C-22.5-SL 10 พบว่าค่าแรงดิ่งของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกันที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน โดยตัวอย่างคอนกรีต C-5-SL 10 มีค่าแรงดิ่งมากที่สุด และ C-22.5-SL 10 มีค่าแรงดิ่งน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดิ่งกับอายุคอนกรีต (ตะกอนประปาแทนที่ร้อยละ 10)

และสำหรับตัวอย่างคอนกรีต C-5-SL 20, C-13.5-SL 20 และ C-22.5-SL 20 ที่ใช้ตะกอนประปาบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 พบว่าที่อายุ 7 วันค่าแรงดิ่งของตัวอย่างคอนกรีต C-5-SL 20, C-13.5-SL 20 และ C-22.5-SL 20 กับตัวอย่างคอนกรีต C-5-SL 10, C-13.5-SL 10 และ C-22.5-SL 10 มีค่าแรงดิ่งของตัวอย่างคอนกรีตใกล้เคียงกัน คือมีค่าประมาณ 9 กก./ cm^2 แต่ที่อายุ 60 วันค่าแรงดิ่งของตัวอย่างคอนกรีต C-5-SL 20, C-13.5-SL 20 และ C-22.5-SL 20 มีค่าแรงดิ่งน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีต C-5-SL 10, C-13.5-SL 10 และ C-22.5-SL 10 ที่มีขนาดน้ำหนักร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของตัวอย่าง C-5-SL 10, C-13.5-SL 10 และ C-22.5-SL 10 ที่มีขนาดน้ำหนักร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของตัวอย่าง C-5-SL 10, C-13.5-SL 10 และ C-22.5-SL 10 เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดิ่งกับอายุคอนกรีต (ตะกอนประปาแทนที่ร้อยละ 20)

4.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าแรงดิ่งโดยตรงของคอนกรีต

จากผลของการใช้ทรายบดที่มีขนาดน้ำหนักร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของตัวอย่าง C-5-SL 10, C-13.5-SL 10 และ C-22.5-SL 10 ที่มีขนาดเท่ากับปูนซีเมนต์ พบว่าค่าแรงดิ่งโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 วัน, 28 วัน และ

60 วัน ของตัวอย่าง C-13.5-SP10 มีค่าแรงดึงน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP10 เท่ากับ -0.36 กก./ซม.², -1.78 กก./ซม.² และ -1.69 กก./ซม.² ตามลำดับ แต่มีค่าแรงดึงมากกว่าตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-SP10 เท่ากับ 0.51 กก./ซม.², 0.14 กก./ซม.² และ 0.94 กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-SP10 มีขนาดน้ำหนักร้อยละ 325 ร้อยละ 13.5 ทำให้ไม่มีผลกระทบกับแรงดึงเนื่องจากมีขนาดเท่ากับปูนซีเมนต์ เปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP10 ที่มีขนาดน้ำหนักร้อยละ 325 ร้อยละ 5 ซึ่งมีขนาดของความละเอียดเล็กกว่า แทนที่ในปริมาณร้อยละที่เท่ากันมีผลทำให้ได้ค่าแรงดึงที่มากกว่า ในทางกลับกัน ตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-SP10 ที่มีขนาดน้ำหนักร้อยละ 325 ร้อยละ 22.5 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าแทนที่ในปริมาณร้อยละที่เท่ากันมีผลทำให้ได้ค่าแรงดึงที่น้อยกว่า เนื่องจากการที่อนุภาคขนาดเล็กจะแทรกอยู่ช่องว่างของมอร์ตาร์ มีการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมทำให้คอนกรีตมีกำลังมากขึ้น

งานวิจัยที่เคยศึกษาถึงผลกระทบของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อกำลังอัด [6] พบว่ากำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของทรายแม่น้ำบด หากทรายแม่น้ำบดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามการใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ทำให้กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวต่ำลง ซึ่งค่ากำลังอัดจะส่งผลต่อค่าแรงดึงใน

คอนกรีตด้วย โดยผลต่างของค่าแรงดึงเนื่องจากขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

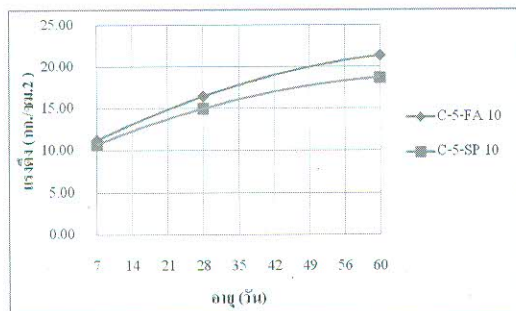
ตารางที่ 3 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (กก./ซม. ²)			
ตัวอย่าง	7 วัน	28 วัน	60 วัน
C-5-SP10 - C-13.5-SP10	-0.36	-1.78	-1.69
C-13.5-SP10 - C-22.5-SP10	0.51	0.14	0.94
C-5-SP20 - C-13.5-SP20	-0.69	-1.21	-1.44
C-13.5-SP20 - C-22.5-SP20	0.82	0.94	1.77

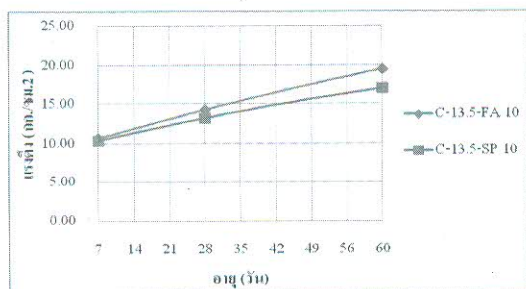
เมื่อพิจารณาตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP20, C-13.5-SP20 และ C-22.5-SP20 เห็นได้ว่ามีทิศทางไปในทางเดียวกับตัวอย่าง C-5-SP10, C-13.5-SP10 และ C-22.5-SP10 โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดในปริมาณร้อยละ 20 ทำให้ค่าผลต่างของค่าแรงดึงมากขึ้นเพราะการแทนที่มากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ทรายแม่น้ำบด หรือเถ้าถ่านหินหรือตะกอนประปาบด ในปริมาณร้อยละที่เท่ากันแต่มีขนาดของความละเอียดแตกต่างกัน ทำให้ค่าแรงดึงที่เกิดจากการที่อนุภาคขนาดเล็กจะแทรกอยู่ช่องว่างของมอร์ตาร์ มีการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลให้ค่าแรงดึงที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กมีค่ามากกว่าค่าแรงดึงที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่กว่า

4.3 ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานและ การแทนที่ต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

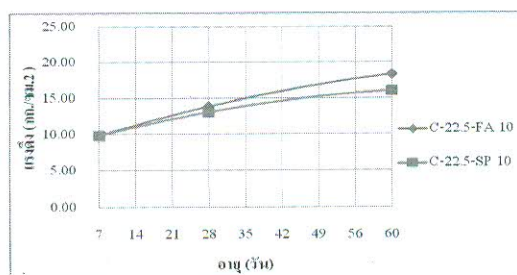
เมื่อนำค่าแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสม FA, SP และ SL ที่มีขนาดน้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 โดยเมื่อใช้การแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 พบว่าที่อายุ 7 วันค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสม FA มีค่ามากที่สุด ส่วน SP และ SL จะมีค่าแรงดึงลดลงตามลำดับ แต่จะมีค่าแรงดึงต่างกันไม่มากนัก ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสม FA, SP และ SL จะให้ค่าแรงดึงที่แตกต่างกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 12, 13 และ 14



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้ำตะแกรง 5% แทนที่ร้อยละ 10)

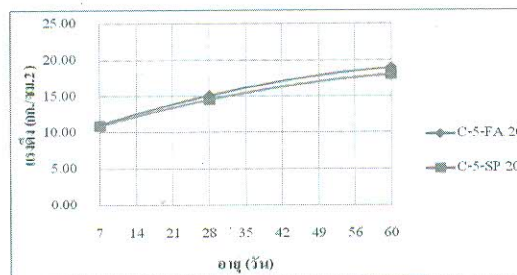


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้ำตะแกรง 13.5% แทนที่ร้อยละ 10)

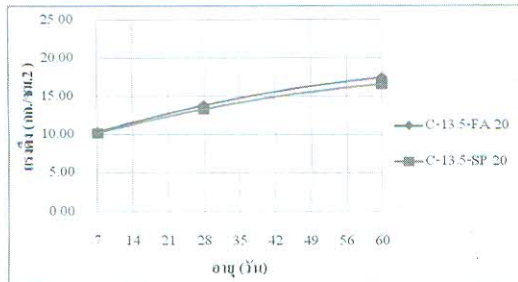


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้ำตะแกรง 22.5% แทนที่ร้อยละ 10)

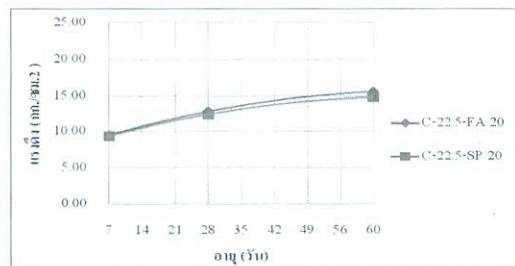
สำหรับตัวอย่างคอนกรีต FA, SP และ SL ที่มีขนาดน้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 โดยเมื่อใช้การแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 พบว่ามีทิศทางไปในทางเดียวกับตัวอย่างคอนกรีต FA, SP และ SL ที่ใช้การแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 แต่จะให้ค่าแรงดึงที่น้อยกว่าการแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่มีขนาดน้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากัน เนื่องจากการใช้ FA, SP และ SL แทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่ามีผลทำให้ค่าแรงดึงลดน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 15, 16 และ 17



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้ำตะแกรง 5% แทนที่ร้อยละ 20)



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้ำตระแกรง 13.5% แทนที่ร้อยละ 20)



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้ำตระแกรง 22.5% แทนที่ร้อยละ 20)

เมื่อนำค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต FA เป็นวัสดุปอซโซลานเทียบกับ SP เป็นวัสดุที่ไม่มีปฏิกิริยาปอซโซลานเนื่องจากความเป็นผลึก[5] ที่มีขนาดน้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ซึ่งผลต่างของค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นก็คือผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

ค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA10 มีค่าเท่ากับ 11.20 กก./ซม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 16.42 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 21.32 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน กับ C-5-SP10 มีค่าเท่ากับ 10.70 กก./ซม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 14.98 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 18.67 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน ซึ่ง

จะมีค่าแรงดึงปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA10 มีค่าเท่ากับ 0.50 กก./ซม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 1.44 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 2.65 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

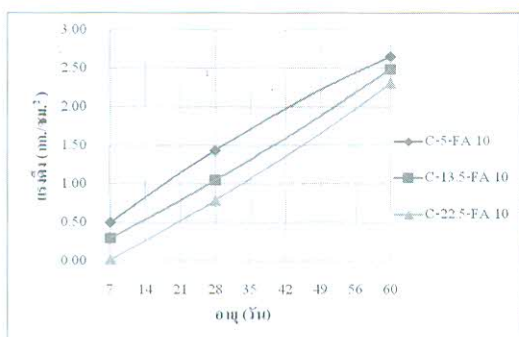
และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-FA10 มีค่าเท่ากับ 10.64 กก./ซม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 14.25 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 19.47 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน กับ C-13.5-SP10 มีค่าเท่ากับ 10.34 กก./ซม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 13.20 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 16.98 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-FA10 มีค่าเท่ากับ 0.30 กก./ซม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 1.05 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 2.49 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-FA10 มีค่าเท่ากับ 9.85 กก./ซม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 13.85 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 18.34 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน กับ C-22.5-SP10 มีค่าเท่ากับ 9.83 กก./ซม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 13.06 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 16.04 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-FA10 มีค่าเท่ากับ 0.02 กก./ซม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 0.79 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 2.30 กก./ซม.² ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลาน

ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงโดยตรง ของคอนกรีต (กก./ชม. ²)			
ตัวอย่าง	7 วัน	28 วัน	60 วัน
C-5-FA10 - C-5-SP10	0.5	1.44	2.65
C-13.5-FA10 - C-13.5-SP10	0.3	1.05	2.49
C-22.5-FA10 - C-22.5-SP10	0.02	0.79	2.3
C-5-FA20 - C-5-SP20	0.17	0.58	0.92
C-13.5-FA20 - C-13.5-SP20	0.15	0.5	0.86
C-22.5-FA20 - C-22.5-SP20	0.16	0.42	0.81

ค่าแรงดึงที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA10 กับ C-5-SP10, C-13.5-FA10 กับ C-13.5-SP10 และ C-22.5-FA10 กับ C-22.5-SP10 แสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานกับอายุคอนกรีต (แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10)

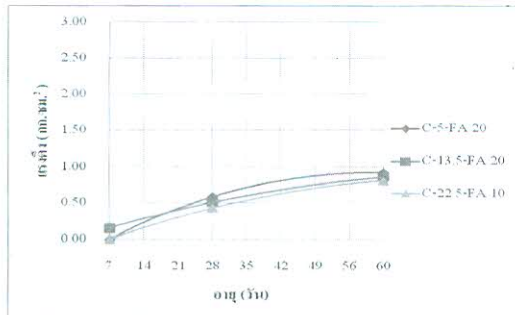
และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA20 มีค่าเท่ากับ 11.02 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 15.09 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 18.91 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน กับ C-5-SP20 มีค่าเท่ากับ 10.85 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 14.51 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 17.99 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะ

มีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA20 มีค่าเท่ากับ 0.17 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 0.58 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 0.92 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-FA20 มีค่าเท่ากับ 10.31 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วันเพิ่มขึ้นเป็น 13.80 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 17.41 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน กับ C-13.5-SP20 มีค่าเท่ากับ 10.16 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วันเพิ่มขึ้นเป็น 13.30 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 16.55 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-FA20 มีค่าเท่ากับ 0.15 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วันเพิ่มขึ้นเป็น 0.50 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 0.86 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-FA20 มีค่าเท่ากับ 9.50 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 12.78 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วันและเพิ่มขึ้นเป็น 15.59 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน กับ C-22.5-SP20 มีค่าเท่ากับ 9.34 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 12.36 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 14.78 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-FA20 มีค่าเท่ากับ 0.16 กก./ชม.² ที่อายุ 7 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 0.42 กก./ชม.² ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 0.81 กก./ชม.² ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ค่าแรงดึงที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA20 กับ C-5-SP20, C-13.5-FA20 กับ C-13.5-SP20 และ C-22.5-FA20 กับ C-22.5-SP20 ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานกับอายุคอนกรีต (แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20)

จากผลต่างของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต จะเห็นได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง มีผลทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงด้วย ส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินบดกับคอนกรีตที่ใช้ทรายบดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าผลต่างของเถ้าถ่านหินบดกับทรายบดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20

5. สรุป

จากการวิจัยผลกระทบของการใช้ตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ ต่อค่าการอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลานของค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

ขนาดของอนุภาคที่ต่างกัน 3 ขนาดคือ ขนาดน้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 โดยที่ขนาดที่เล็กที่สุดจะให้ค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตสูงกว่าขนาดที่ใหญ่กว่า

5.2 ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานและปริมาณแทนที่ต่อการทดสอบค่าแรงดึงโดยตรง

การใช้เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตสูงกว่าการใช้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่กว่า และการแทนที่มากขึ้นผลของปฏิกิริยาปอซโซลานก็ลดลง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องทดสอบแรงดึง และอาจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ที่แนะนำและให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วศิน ดินกาหมื่น, วิษณุ ชุกกลีน, สุวัชชัย ละไข้อยู่, อนุพงศ์ ผาตะพงษ์, 2555. การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตกำลังสูงที่อายุต้น สำหรับงานคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป. ปรัญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลธัญบุรี.

- [2] ธวัชชัย พลรักษ์, ศรายุทธ เทียงแท้, รณชัย
รุกขวัฒน์, ฐิติกร แก้วประชา, 2556.
การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา
มาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีต
กำลังสูงสำหรับงานคอนกรีตสำเร็จรูป.
ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [3] กิรติกร อินทร์ักษ์, ณัฐวุฒิ หมูใหญ่, นัฐ
พงศ์หลสุวรรณ, ปฐมพงษ์ โสภา, 2556.
การนำตะกอนประปามาใช้เป็นส่วน
ผสมคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป. ปริญญา
นิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลธัญบุรี.
- [4] เรืองรุชต์ ชีระโรจน์, จตุพล ตั้งปกาศิต,รศ.
ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิกเกียรติ
โกมล, 2546. “ผลกระทบของขนาด

อนุภาคเถ้าถ่านหินแม่เมาะต่อดัชนี
กำลังมอร์ตาร์,” วารสารวิจัยและพัฒนา
มจร.ปีที่. 26, ฉบับที่. 3, : 295 – 310.

- [5] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสงวาทรงหมู่, ชัย จาตุร-
พิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิกเกียรติโกมล,
2548 “การศึกษาค่าดัชนีกำลังของ
มอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน
การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยา
ปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้
และเถ้าปาล์มน้ำมัน,” วารสารวิจัย
และพัฒนา มจร., ปีที่. 28,ฉบับที่. 4, :
465 – 476.
- [6] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสงวาทรงหมู่, ชัย จาตุร
พิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิกเกียรติโกมล,
2546 “การศึกษาผลกระทบของการ
อัดตัวของอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของ
มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 618
โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด,”วารสาร
วิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่. 30, ฉบับที่. 1,
: 141 – 151.