บทที่ 3

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม, ปริมาณสารลดน้ำพิเศษและเวลาก่อนการผสมซ้ำ ที่มีต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตผสมซ้ำ การทดสอบทำในสภาวะที่ถูกควบคุมในห้องปฏิบัติการ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างทดสอบ 35°C ควบคุมการระเหยของน้ำออกจากผสมของคอนกรีตด้วยผ้าขาวบางชื้นและทำการกวนส่วนผสมทุก 30 นาที สำหรับคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตผสมซ้ำที่ได้จากการศึกษามีดังนี้

3.1 พฤติกรรมการพัฒนาหน่วยแรงต้านทานและการก่อตัวของคอนกรีตผสมซ้ำ (Stiffening & Setting)

ขบวนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคอนกรีตสดจากสภาพเหลวและสามารถไหลลื่นได้เป็นสภาพแข็งนั้นสามารถแสดงได้ด้วยการ พิจารณาหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็มมาตรฐานที่เวลาต่าง ๆ หลังจากการผสม ตามมาตรฐาน ASTM:C-403 ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบต่างๆที่มีต่อการพัฒนาหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็มสำหรับคอนกรีตผสมซ้ำ สามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้คือ

3.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จากการศึกษาคอนกรีตผสมซ้ำที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.4-0.6 และปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมคงที่ 300 กก./ลบม.

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหลังการผสมกับหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็ม สามารถลากเส้นความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ ได้โดยใช้วิธีกำลังสองต่ำสุดตามแสดงในรูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าสำหรับคอนกรีตที่ผสมครั้งแรก การพัฒนาหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็มจะมีอัตราสูงสุดเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำสุด และอัตราการพัฒนาจะลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าการพัฒนาความต้านทานการจมของเข็มจะแปรโดยตรงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทั้งนี้มีผู้วิจัยพบว่า (11) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่าจะทำให้เกิดเอททริงไงต์ ซึ่งมีผลหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีปริมาณลดลง ดังนั้นจึงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสามารถเกิดได้ในอัตราที่เร็วขึ้น

การพัฒนาหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็ม สำหรับคอนกรีตผสมซ้ำที่ 1, 2 และ3 ชม. จะมีอัตราการพัฒนาหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็มสูงสุดเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำสุด ซึ่งผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อคอนกรีตผสมซ้ำจะมีพฤติกรรมเหมือนกับผลกระทบต่อคอนกรีตที่ผสมครั้งแรก

3.1.2 <u>ผลกระทบของปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม</u> จากการศึกษาคอนกรีตผสมซ้ำที่มีปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม 300-400 กก./ลบม. โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเมื่อนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหลังการผสมซ้ำกับหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็มสำหรับคอนกรีตผสมซ้ำที่มีปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมต่างๆตามแสดงในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมไม่มีผลกระทบต่อการพัฒนาหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็ม แต่การพัฒนาความต้านทานการจมของเข็มจะขึ้นอยู่กับเวลาก่อนการผสมซ้ำซึ่งสามารถลากเส้นความสัมพันธ์สำหรับเวลาก่อนการผสมซ้ำต่าง ๆ ได้ตามรูป

3.1.3 ผลกระทบของปริมาณสารลดน้ำพิเศษ ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณสารลดน้ำพิเศษต่อการพัฒนาความต้านทานหลังการผสมซ้ำของคอนกรีตกลุ่ม A-2 และ A-3 โดยทำการผสมซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษระหว่าง 0-1,0-4 และ 0-6 % ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ

รูปที่ 2.3(ก) แสดงผลกระทบของปริมาณสารลดน้ำพิเศษต่อการพัฒนาหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็มสำหรับคอนกรีตกลุ่ม A-2 ที่เวลาก่อนการผสมซ้ำ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จากเส้นความสัมพันธ์ที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษต่างๆ จะเห็นได้ว่าอัตราการพัฒนาหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็มมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับการผสมซ้ำที่เวลาเดียวกัน แต่จุดเริ่มต้นของการพัฒนาถูกเลื่อนออกไปตามปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้น ในการผสมซ้ำที่1ชม. เมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษ 0.2, 0.5 และ 1 % ของน้ำหนักซีเมนต์จะทำให้เวลาที่คอนกรีตผสมซ้ำเริ่มพัฒนาถูกเลื่อนออกไปประมาณ 15,25 และ 35 นาที ตามลำดับ โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 1.4, 6.3 และ 2.3 % ตามลำดับ ที่เวลาก่อนการผสมซ้ำ 2 ชั่วโมงเมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษ 2 และ 4 %ของน้ำหนักซีเมนต์จะทำให้คอนกรีตผสมซ้ำเริ่มพัฒนาความต้านทานช้าลงประมาณ 15 และ 25นาที ตามลำดับ โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 28.4 และ 4.8 % ตามลำดับ และที่เวลาก่อนการผสมซ้ำ 3 ชั่วโมง เมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษ 3 และ 6 % ของน้ำหนักซีเมนต์ จะทำให้คอนกรีตผสมซ้ำเริ่มพัฒนาความต้านทานช้าลงประมาณ 15 และ 30 นาที ตามลำดับ โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 9.2 และ 9.6 % ตามลำดับ ดังนั้นจากผลที่ได้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าสารลดน้ำพิเศษจะมีผลหน่วงปฏิกิริยาไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่งตามปริมาณที่ใช้ จากนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะดำเนินต่อไปตามขั้นตอนในขณะนั้น ๆ ทั้งนี้เนื่องจาก (14) สารลดน้ำพิเศษเมื่อถูกเติมลงในส่วนผสมคอนกรีตจะทำหน้าที่แยกอนุภาคซีเมนต์กับน้ำออกจากกันโดยสารลดน้ำพิเศษจะเข้าไปเคลือบอนุภาคซีเมนต์เพื่อให้เกิดความไหลลื่นของคอนกรีตสด ซึ่งทำให้ช่วงเวลาที่สารลดน้ำพิเศษยังไม่แยกตัวออกจากมวลคอนกรีตมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้น้อย และการแยกตัวออก

ของสารลดน้ำพิเศษย่อมต้องใช้เวลามากขึ้นเมื่อปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เทียบเป็นเปอร์เซนต์ของน้ำหนักซีเมนต์มากขึ้น สำหรับคอนกรีตกลุ่ม A-3 ตามแสดงในรูปที่ 2.3(ข) จะเห็นว่ามีพฤติกรรมมีความสอดคล้องกับคอนกรีตกลุ่ม A-2

3.2 <u>เวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมช้ำ</u>

อัตราการพัฒนาความต้านทานการจมของเข็มที่แตกต่างกันตามที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.1 มีผลโดยตรงต่อเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมช้ำ จากรูปที่ 2.1-2.3 สามารถหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมช้ำได้โดยเวลาก่อตัวเริ่มแรก คือเวลาที่คอนกรีตผสมช้ำมีความต้านทาน 35 กก/ซม.^{2} และเวลาก่อตัวสุดท้าย คือเวลาที่คอนกรีตผสมช้ำมีความต้านทาน 276 กก/ซม.^{2} ในการหาเวลาการก่อตัวนั้นในงานวิจัยนี้จะถือเอาเวลาหลังการผสมครั้งแรกเป็นจุดเริ่มต้นในการนับเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมช้ำ จากหัวข้อ 3.1 พบว่าอัตราการพัฒนาหน่วยแรงต้านทานการจมของเข็มในคอนกรีตผสมช้ำนั้นขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณสารลดน้ำพิเศษ ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึง ผลกระทบเหล่านี้ที่มีต่อเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมช้ำได้ดังนี้คือ

3.2.1 <u>ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์</u> จากเวลาก่อตัวเริ่มแรกและเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตผสมช้ำที่เวลาต่างๆ ตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ซึ่งหาได้จากรูปที่ 2.1 เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับเวลาการก่อตัวจะได้ตามรูปที่ 3.1และ3.2

รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับเวลาก่อตัวเริ่มแรกของคอนกรีตผสมช้ำที่เวลาต่างๆ จากความสัมพันธ์ที่ได้สามารถลากเส้นความสัมพันธ์ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น จะเห็นได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงเวลาเริ่มก่อตัวตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะใกล้เคียงกันทั้งการผสมครั้งแรกและคอนกรีตที่ผสมช้ำในเวลาต่างๆกล่าวคือเวลาเริ่มก่อตัวจะยาวขึ้นประมาณ 25 นาที เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น 0.1 โดยมี

สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 7 %

รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตผสมซ้ำที่เวลาต่าง ๆ เส้นความสัมพันธ์ในรูปได้จากการใช้วิธีกำลังสองต่ำสุดประมาณเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ผสมครั้งแรกและคอนกรีตผสมซ้ำที่เวลาต่างๆ ให้อัตราเปลี่ยนแปลงเวลาก่อตัวเสร็จตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประมาณ 30 นาทีเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง 0.1 โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 12 %

ดังนั้นจากรูปที่ 3.1และ3.2 สามารถประมาณได้ว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 จะมีเวลาก่อตัวเริ่มแรกที่ 1:20, 2:05, 2:55 และ 3:45 ชม. และเวลาก่อตัวสุดท้ายประมาณ 2:25, 3:25, 4:15 และ 4:40 ชม. สำหรับการผสมครั้งแรก, ผสมซ้ำที่1ชม., ผสมซ้ำ ที่ 2 ชม.และผสมซ้ำที่ 3 ชม.ตามลำดับ โดยเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้นทุกๆ 0.1 จะทำให้เวลาก่อตัวเริ่มแรกและเวลาก่อตัวสุดท้ายยาวขึ้น 25 และ30 นาทีตามลำดับซึ่งจากการประมาณนี้สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ตามตารางที่ 3.1

3.2.2 <u>ผลกระทบของสารลดน้ำพิเศษ</u> สารลดน้ำพิเศษทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นถูกหน่วงไว้ระยะเวลาหนึ่งดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.1.3 จากรูปที่ 2.3 สามารถหาเวลาก่อตัวเริ่มต้นและเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตกลุ่ม A-2 และ A-3 และเมื่อนำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำพิเศษกับเวลาก่อตัวได้ตามรูปที่ 3.3 และ 3.4

จากรูปที่ 3.3 และ 3.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษจะทำให้เวลาก่อตัวยาวขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงอัตราการเพิ่มเวลาก่อตัวเริ่มแรกและเวลาก่อตัวสุดท้ายตามปริมาณสารลดน้ำพิเศษจะมีค่าใกล้เคียงกันดังจะเห็นได้จากในการผสมซ้ำคอนกรีตกลุ่ม A-2และA-3

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบเวลาก่อตัวตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

เวลาก่อนการผสมซ้ำ	w/c	ผลการทดสอบ		การประมาณ	
		ก่อตัวเริ่มแรก ชม.:นาที	ก่อตัวสุดท้าย ชม.:นาที	ก่อตัวเริ่มแรก ชม.:นาที	ก่อตัวสุดท้าย ชม.:นาที
0	0.4	1:05	2:25	1:20	2:30
	0.5	1:50	3:20	1:45	3:05
	0.6	2:00	3:35	2:10	3:35
1	0.4	2:20	3:25	2:05	3:15
	0.5	2:35	3:45	2:30	3:45
	0.6	3:10	4:25	2:55	4:15
2	0.4	3:10	4:15	2:55	4:00
	0.5	3:20	4:25	3:20	4:35
	0.6	3:50	5:00	3:45	5:05
3	0.4	3:35	4:40	3:45	4:35
	0.5	3:45	4:45	4:10	5:05
	0.6	4:20	5:40	4:35	5:35

หมายเหตุ เวลาก่อตัวเริ่มนับหลังการผสมครั้งแรก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ 1ชม. เมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษ 1%ของน้ำหนักซีเมนต์ในส่วนผสมจะทำให้เวลาก่อตัวเริ่มแรกและเวลาก่อตัวสุดท้ายยาวขึ้นประมาณ 40 นาที

อัตราเพิ่มเวลาก่อตัวตามปริมาณสารลดน้ำพิเศษจะลดลงเมื่อเวลาก่อนการผสมซ้ำยาวขึ้น การใช้สารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นทุกๆ 1%ของน้ำหนักซีเมนต์จะทำให้เวลาก่อตัวยาวขึ้น 7 และ4 นาที สำหรับการผสมซ้ำที่ 2 และ3 ชม.ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าประสิทธิผลของสารลดน้ำพิเศษนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะของซีเมนต์เพสต์ในขณะนั้นด้วย

จากที่กล่าวมาแล้วสามารถแสดงเวลาก่อตัวที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารลดน้ำพิเศษสำหรับการผสมซ้ำที่เวลาต่างๆ โดยอาศัยวิธีกำลังสองต่ำสุดได้ดังนี้คือ

$$\Delta I, \Delta F = (100.7 - 76.5t + 14.8t^2)\, Q \quad \text{---- (3.1)}$$

เมื่อ ΔI = เวลาก่อตัวเริ่มแรกที่ยาวขึ้นเนื่องจากผลของสารลดน้ำพิเศษ, นาที

ΔF = เวลาก่อตัวสุดท้ายที่ยาวขึ้นเนื่องจากผลของสารลดน้ำพิเศษ, นาที

t = เวลาก่อนการผสมซ้ำ, ชม.

Q = ประมาณสารลดน้ำพิเศษ, % ของน้ำหนักซีเมนต์ในส่วนผสม

สมการที่ (3.1) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 มีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 10 และ 14% สำหรับการเพิ่มเวลาเริ่มก่อตัวและเวลาก่อตัวแล้วเสร็จตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตการเพิ่มเวลาก่อตัว ตามปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

เวลาก่อนการผสมซ้ำ ชม.	สารลดน้ำพิเศษ %	เวลาก่อตัวเริ่มแรก นาที			เวลาก่อตัวสุดท้าย นาที			สมการ 3.1 นาที
		A1	A2	เฉลี่ย	A1	A2	เฉลี่ย	
1	0.2	6	10	8	6	9	8	8
	0.5	16	24	20	15	23	19	20
	1.0	32	49	41	30	46	38	39
2	1	7	6	7	6	7	7	7
	2	13	12	13	13	14	14	14
	4	27	25	26	26	29	28	28
3	1	6	3	5	4	3	4	4
	3	19	8	14	11	9	10	13
	6	39	16	28	23	18	21	26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ความสามารถเทได้ของคอนกรีตผสมซ้ำ

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาความสามารถเทได้ของคอนกรีตผสมซ้ำ 2 ประการคือการยุบตัวและการไหลซึ่งจากการทำการผสมซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ชม. โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้คือ

3.3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

จากการทดลองตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4,0.5 และ 0.6 โดยมีปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมคงที่ ที่ 300 กก/ม^3 พบว่า การสูญเสียการยุบตัวและการไหลมีความสัมพันธ์กับเวลาก่อนการผสมซ้ำดังแสดงในรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาก่อนการผสมซ้ำกับการสูญเสียความสามารถเทได้สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4, 0.5 และ 0.6 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงจะทำให้การสูญเสียความสามารถเทได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่เวลาก่อนการผสมซ้ำเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจาก(26) การระเหยของน้ำจะมีอัตราสูงสุดเมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำสุดตามรูปที่ 1.5 นอกจากนี้ (11) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดได้เร็วขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงทำให้เกิดความกระด้างได้มากกว่า

3.3.2 ผลกระทบของปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์สูญเสียความสามารถเทได้กับเวลาก่อนการผสมซ้ำของคอนกรีตที่มีปริมาณในส่วนผสม 300, 350 และ 400 กก/ม^3 จากเส้นความ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัมพันธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า การสูญเสียความสามารถเทได้ของคอนกรีตผสมซ้ำมีผลเนื่องจากเวลาก่อนการผสมซ้ำเป็นหลัก และปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมไม่มีผลต่อการสูญเสียความสามารถเทได้

จากที่กล่าวมานี้จะเห็นว่าการสูญเสียการยุบตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาก่อนการผสมซ้ำ จากรูปที่ 3.5 พบว่าการสูญเสียการยุบตัวที่เวลาก่อนการผสมซ้ำ 1, 2 และ 3 ชม. ประมาณ 40, 70 และ 100% ของการยุบตัวเริ่มต้นตามลำดับ และการสูญเสียการไหลประมาณ 15, 25 และ 35%ของการไหลเริ่มต้นตามลำดับ ค่าประมาณการสูญเสียการยุบตัวสามารถแสดงขอบเขตสูงสุด, ต่ำสุดได้ตามตารางที่ 3.3 และเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่นมาตามรูปที่3.6 จะให้ค่าสูงกว่าผลการทดสอบของธาดา(1) ประมาณ 6% และต่ำกว่าผลการทดสอบของ วินิต(2) ประมาณ 18%

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตของการสูญเสียความสามารถเทได้

เวลาก่อนการผสมซ้ำ ชม.	%สูญเสียการยุบตัว		%สูญเสียการไหล		ค่าประมาณ %สูญเสียการยุบตัว	ค่าประมาณ % สูญเสียการไหล
	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด		
1	54	39	17	9	40	15
2	75	47	38	16	70	25
3	100	90	43	28	100	35

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาเหตุของการสูญเสียความสามารถเทได้ของคอนกรีตผสมซ้ำสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

ก. ความร้อนสะสมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาก่อนการผสมซ้ำ ทำให้อัตราการระเหยเร็วขึ้น (10) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิของมวลคอนกรีตเพิ่มขึ้นเนื่องผลของการขัดสีที่เกิดขึ้นในเครื่องผสม

ข. เมื่อเวลาก่อนการผสมซ้ำยาวขึ้น จะได้ซีเมนต์เจลซึ่งเกิดจากซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากซีเมนต์เจลมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าซีเมนต์ถึง 1,000 เท่า (28) ดังนั้นจึงดูดซับน้ำได้มากขึ้น

3.3.3 ผลกระทบของสารลดน้ำพิเศษ

ในการศึกษาผลกระทบของสารลดน้ำพิเศษต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถเทได้ของคอนกรีตผสมซ้ำ ได้ทำการศึกษาจากคอนกรีตกลุ่ม A-2 และ A-3 ซึ่งมีส่วนผสมที่ต่างกัน จากการเติมสารลดน้ำพิเศษในปริมาณระหว่าง 0-1 %, 0-4 % และ 0-6 % ของน้ำหนักซีเมนต์ในส่วนผสมลงในคอนกรีตผสมซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ชม. ตามลำดับ พบว่าการเปลี่ยนแปลงความสามารถเทได้ของคอนกรีตผสมซ้ำจะสัมพันธ์กับปริมาณสารลดน้ำพิเศษตามรูปที่ 2.6

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าการยุบตัวและการไหลของคอนกรีตผสมซ้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารลดน้ำพิเศษ การเพิ่มความสามารถเทได้ด้วยสารลดน้ำพิเศษจะขึ้นอยู่กับเวลาก่อนการผสมซ้ำด้วย กล่าวคือเมื่อเวลาก่อนการผสมซ้ำยาวขึ้นจะต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อเพิ่มความสามารถเทได้ในสัดส่วนที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจาก (14) การเพิ่มความสามารถ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เทได้ด้วยสารลดน้ำพิเศษนั้น เกิดจากการที่สารลดน้ำพิเศษไปเคลือบอนุภาคซีเมนต์ทำให้เกิดความลื่นขึ้นในเนื้อซีเมนต์เพสต์ แต่เมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยาได้เป็นซีเมนต์เจลซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นดังได้กล่าวแล้ว จึงทำให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณมากขึ้นเพื่อเคลือบอนุภาคซีเมนต์เจล

ถ้าถือว่าอัตราเพิ่มความสามารถเทได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณสารลดน้ำพิเศษ ทำให้สามารถเขียนสมการเพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงความสามารถเทได้ของคอนกรีตผสมซ้ำด้วยสารลดน้ำพิเศษได้ดังนี้คือ

$$\Delta_s(t) = \Delta_s^{(-)}(t) + K_s(t)\,Q \quad \text{---------- (3.2)}$$

$$\Delta_f(t) = \Delta_f^{(-)}(t) + K_f(t)\,Q \quad \text{---------- (3.3)}$$

เมื่อ $\Delta_s(t)$ = %เปลี่ยนแปลงการยุบตัวของคอนกรีตผสมซ้ำด้วยสารลดน้ำพิเศษเมื่อเทียบกับการยุบตัวเริ่มต้น ที่เวลา t

$\Delta_f(t)$ = %เปลี่ยนแปลงการไหลของคอนกรีตผสมซ้ำด้วยสารลดน้ำพิเศษเมื่อเทียบกับการไหลเริ่มต้น ที่เวลา t

$\Delta_s^{(-)}(t)$ = %สูญเสียการยุบตัวเมื่อเทียบกับการยุบตัวเริ่มต้น ที่เวลา t

$\Delta_f^{(-)}(t)$ = %สูญเสียการไหลเมื่อเทียบกับการไหลเริ่มต้น ที่เวลา t

$K_s(t)$ = อัตราเพิ่มการยุบตัวเป็น%ของการยุบตัวเริ่มต้นต่อปริมาณสารลดน้ำพิเศษ 1%ของน้ำหนักซีเมนต์ ที่เวลา t, ตามตารางที่ 3.4

$K_f(t)$ = อัตราเพิ่มการไหลเป็น%ของการไหลเริ่มต้นต่อปริมาณสารลดน้ำพิเศษ 1%ของน้ำหนักซีเมนต์ ที่เวลา t, ตามตารางที่ 3.4

Q = ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ, %ของน้ำหนักซีเมนต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 อัตราเพิ่มความสามารถเทได้ด้วยสารลดน้ำพิเศษ

เวลาก่อนการผสมซ้ำ ชม.	K_s	K_f
1	200	40
2	30	10
3	25	5

จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 พบว่าปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสมซึ่งทำให้คอนกรีตผสมซ้ำด้วยสารลดน้ำพิเศษมีความสามารถเทได้ใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นที่สุด ประมาณ 0.2, 2 และ4%ของน้ำหนักซีเมนต์ สำหรับการผสมซ้ำที่ 1, 2 และ3 ชม.ตามลำดับ โดยมีระยะเริ่มก่อตัวหลังการผสมซ้ำประมาณ 90%ของการผสมครั้งแรก

3.4 กำลังอัดประลัย

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมซ้ำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดในการยอมรับวิธีการผสมซ้ำด้วยสารลดน้ำพิเศษ จากการทดลองสามารถจำแนกผลกระทบต่าง ๆ ที่มีต่อกำลังอัดประลัยที่ 28 วันของคอนกรีตผสมซ้ำได้ดังนี้

3.4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

จากการทดลองผสมซ้ำคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4, 0.5 และ 0.6 โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม 300 กก/ม^3 พบว่าค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน ของคอนกรีตผสมซ้ำที่เวลาต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงจากกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมครั้งแรก จากรูปที่ 2.7(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยไม่มีสัมพันธ์กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ รูปที่ 2.7(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาก่อนการผสมซ้ำกับการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมซ้ำที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ จะเห็นว่า สามารถลากเส้นความสัมพันธ์ได้ตามรูป ซึ่งแสดงว่าตัวแปรหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมซ้ำคือ เวลาก่อนการผสมซ้ำ โดยผลกระทบของอัตราการระเหยของน้ำที่ต่างกันเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ จะมีผลต่อกำลังอัดประลัยที่ 28 วันน้อยมาก จนสามารถไม่นำพิจารณาได้

3.4.2 ผลกระทบของประมาณซีเมนต์ในส่วนผสม

จากการทดลองผสมซ้ำคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม 300, 350 และ 400 กก/ม^3 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ซึ่งนำผลการทดสอบมาแสดงได้ในรูปที่ 2.8 (ก), (ข) จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมซ้ำแสดงความสัมพันธ์กับเวลาก่อนการผสมซ้ำซึ่งสามารถลากเส้นความสัมพันธ์ได้ตามรูปที่ 2.8(ข) แสดงว่าผลกระทบเนื่องจากปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมที่มีต่อกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน จะมีน้อยมากจนสามารถไม่นำมาพิจารณาได้

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมซ้ำน้อยมากดังนั้นจึงสามารถแสดง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาก่อนการผสมซ้ำ กับการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 3.7 สามารถหาความสัมพันธ์ได้โดยวิธีกำลังสองต่ำสุด พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมซ้ำจะเพิ่มขึ้นประมาณ 4, 9 และ15%ของกำลังอัดประลัยคอนกรีตผสมครั้งแรก ที่เวลาก่อนการผสมซ้ำ 1, 2 และ 3 ชม.ตามลำดับ ซึ่งเขียนในรูปสมการได้ดังนี้คือ

$$\Delta\sigma = 1.4 + 1.9\ t + 0.9\ t^2 \quad -- (3.4)$$

เมื่อ $\Delta\sigma$ = % การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน ของคอนกรีตผสมซ้ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมครั้งแรก

t = เวลาก่อนการผสมซ้ำ, ชม.

จากสมการที่ 3.2 เมื่อเทียบกับผลการทดลองของ ธาดา(1) และวินิต (2) ตามรูปที่ 3.8 และตารางที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการใช้สมการที่ 3.2 จะให้ค่าต่ำกว่าผลการทดลองของ ธาดา (1) และสูงกว่าผลการทดลองของวินิต (2)

เมื่อพิจารณาถึงการสูญเสียผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในการผสมซ้ำ พบว่าสำหรับสภาพอุณหภูมิที่ทำการทดลอง (5,9,10) คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 สามารถหาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เวลา 1, 2 และ 3 ชม. หลังการผสมครั้งแรกปฏิกิริยาสะสมที่เกิดขึ้นประมาณ 3, 4 และ 5 % ของปฏิกิริยาสะสมที่ 28 วันตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าถ้าไม่มีปัจจัยอื่นมากระทบต่อคุณสมบัติด้านรับแรงของคอนกรีตผสมซ้ำแล้ว กำลังอัดประลัยที่ 28 วันของคอนกรีตผสมซ้ำควรจะลดลงในอัตราเดียวกับการสูญเสียผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่เนื่องจากการผสมซ้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่ส่งผลให้มีกำลังอัดประลัยสูงขึ้นดังต่อไปนี้คือ

ตารางที่ 3.5 ขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน

เวลาก่อนการผสมซ้ำ นาที	ผลการทดสอบ		ธาดา (1)		วินิต (2)		สมการ 3.5
	สูงสุด %	ต่ำสุด %	สูงสุด %	ต่ำสุด %	สูงสุด %	ต่ำสุด %	
30	-	-	+15	-2	+13	-26	+3
60	+22	-3	+1	-11	+11	-12	+4
80	-	-	+18	-2	-	-	+6
90	-	-	-	-	+18	-9	+6
100	-	-	+17	-3	-	-	+7
120	+16	-12	+20	-4	+18	-14	+9
140	-	-	+21	+6	-	-	+11
150	-	-	-	-	+18	-1	+12
160	-	-	+20	-7	-	-	+13
180	+30	-15	-	-	+23	-1	+15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. จากการระเหยของน้ำเนื่องจากผลกระทบของความร้อนของปฏิกิริยา, การขัดสีของมวลรวมและอากาศภายนอก ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตผสมซ้ำลดลง (28) ซึ่งทำให้อัตราส่วนเจลต่อช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่เกิดขึ้นในภายหลังมีค่าลดลง

ข. การระเหยของน้ำ(12)ทำให้ความพรุนของคอนกรีตผสมซ้ำมีค่าลดลง ซึ่งจากรูปที่ 1.8 พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ความพรุน จะเห็นได้ว่าถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงเนื่องจากการระเหยของน้ำ จะทำให้สัม[redacted]ความพรุนต่ำลงมีผลให้กำลังอัดประลัยสูงขึ้น

3.4.4 <u>ผลกระทบของสารลดน้ำพิเศษ</u> จากการทดสอบคอนกรีตกลุ่ม A-2 และกลุ่ม A-3 โดยใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษระหว่าง 0-1, 0-4 และ 0-6 % ของน้ำหนักซีเมนต์ในส่วนผสม สำหรับการผสมซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ชม. ตามลำดับ

รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำพิเศษกับการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยเมื่อเทียบกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมครั้งแรก จะเห็นได้ว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมซ้ำด้วยสารลดน้ำพิเศษจะมีค่าสูงกว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมครั้งแรก โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้

3.4.5 <u>ผลกระทบของอายุคอนกรีต</u>

จากการทดสอบคอนกรีตกลุ่ม D-2-2 และ D-3-3 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยที่อายุต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าคอนกรีตผสมซ้ำด้วยสารลดน้ำพิเศษมีการพัฒนากำลังอัดประลัยเร็วกว่าคอนกรีตที่ผสมครั้งแรกซึ่งเป็นผลเนื่องจาก

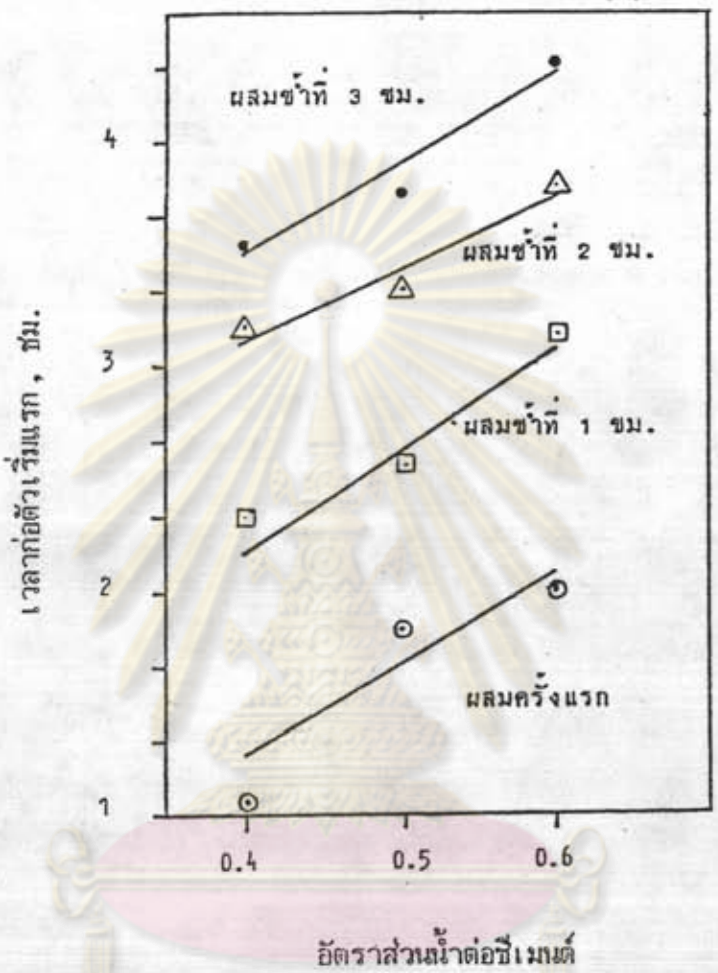
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. การระเหยของน้ำทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตผสมซ้ำลดลงดังนั้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเร็วขึ้น (11) นอกจากนี้ยังทำให้กำลังอัดประลัยที่อายุเท่ากันเพิ่มขึ้นด้วย

ข. การที่สารลดน้ำพิเศษทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นช้าลงในช่วง 1 ชั่วโมงแรกหลังการผสมซ้ำ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในระยะหลังดีขึ้น (27) ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

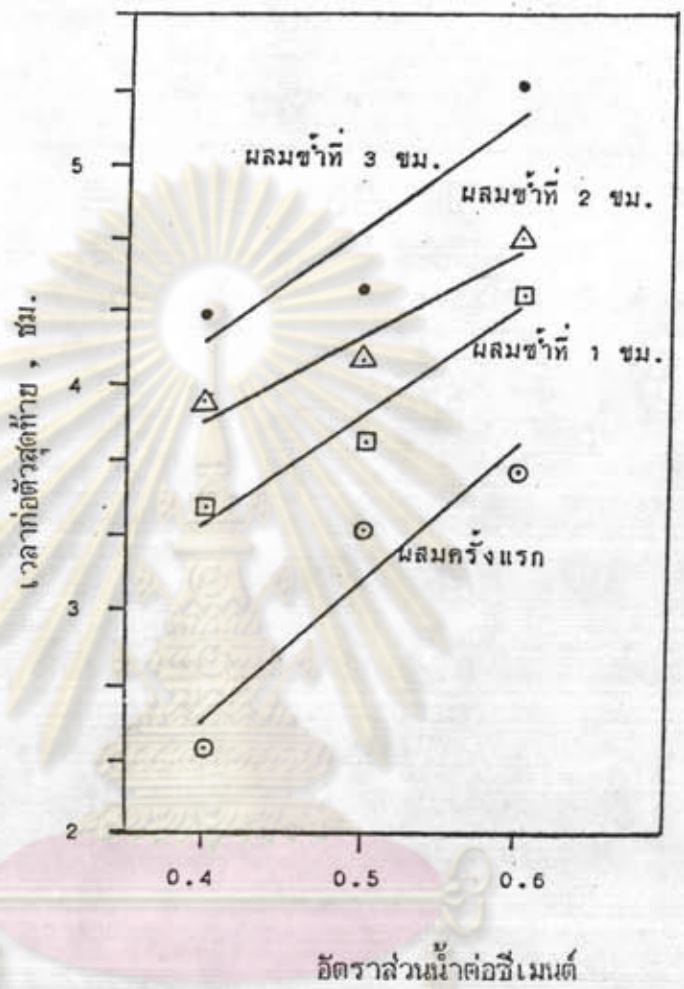
ซึ่งจากสาเหตุทั้งสองประการนี้ ทำให้คอนกรีตผสมซ้ำด้วยสารลดน้ำพิเศษมีการพัฒนากำลังอัดประลัยที่อายุต่าง ๆ ได้เร็วกว่าคอนกรีตที่เก็บตัวอย่างจากการผสมครั้งแรก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



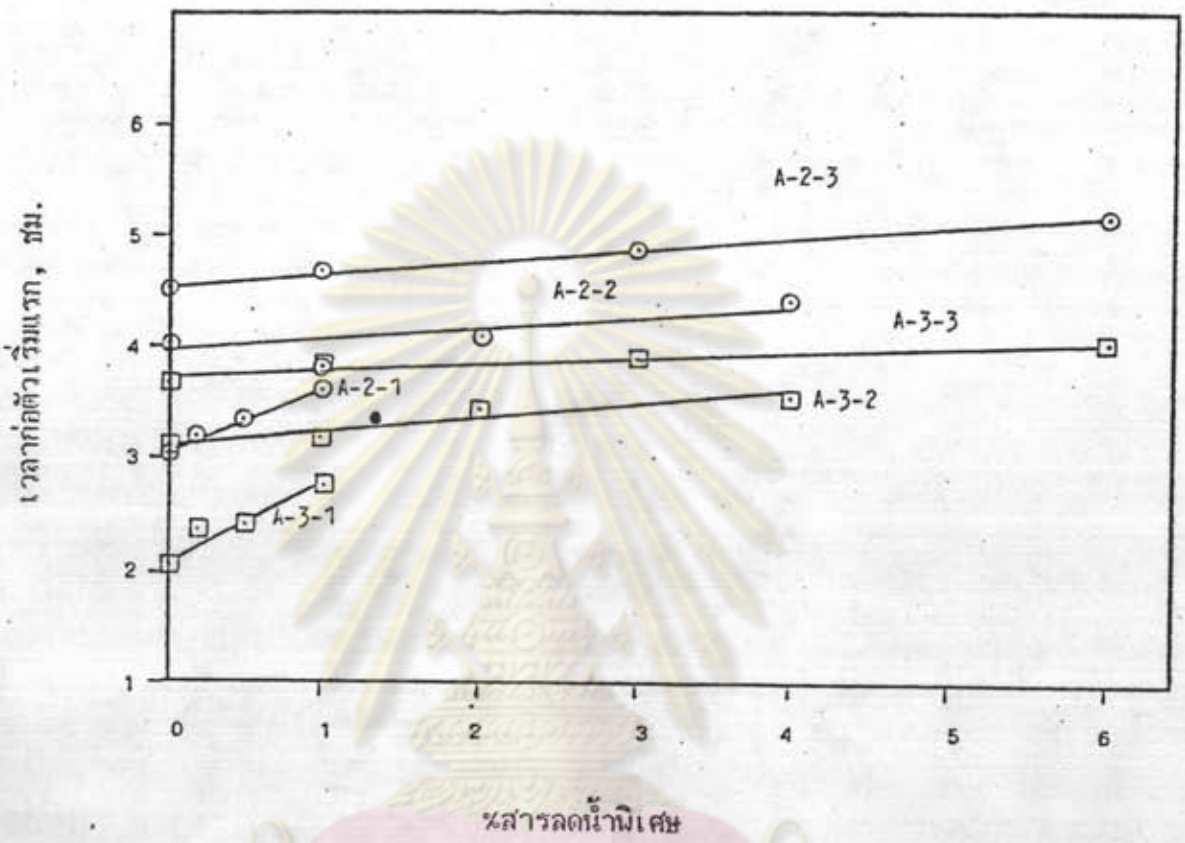
รูปที่ 3.1 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อ เวลาก่อตัวเริ่มแรก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



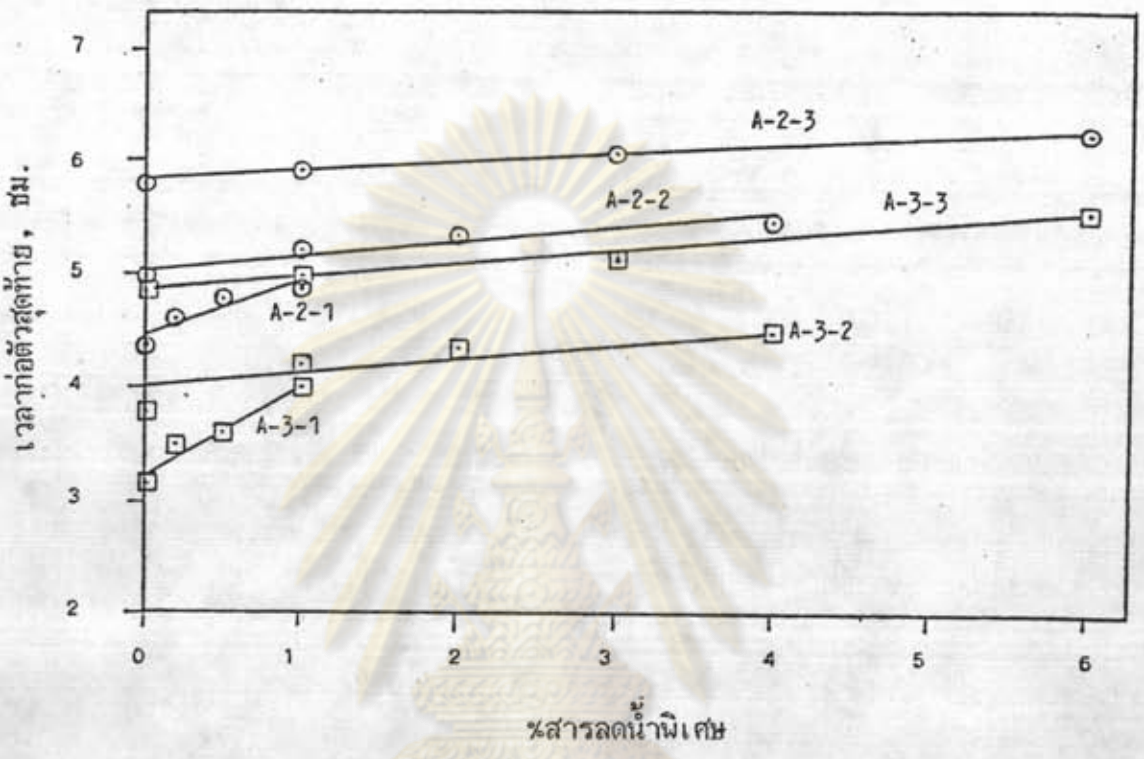
รูปที่ 3.2 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อเวลาก่อตัวสุดท้าย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



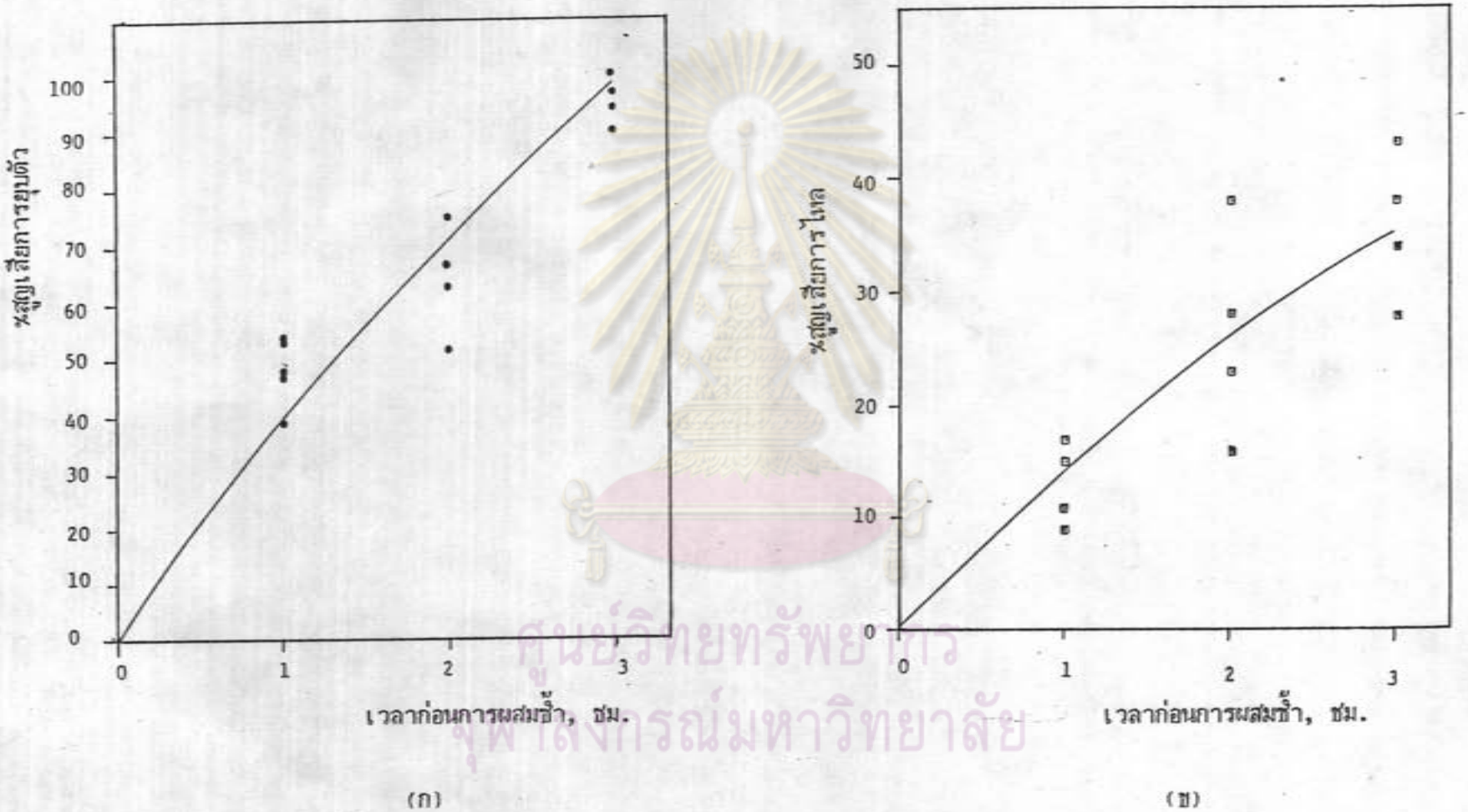
รูปที่ 3.3 ผลกระทบของปริมาณสารลดน้ำพิเศษต่อ เวลาก่อตัวเริ่มแรก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



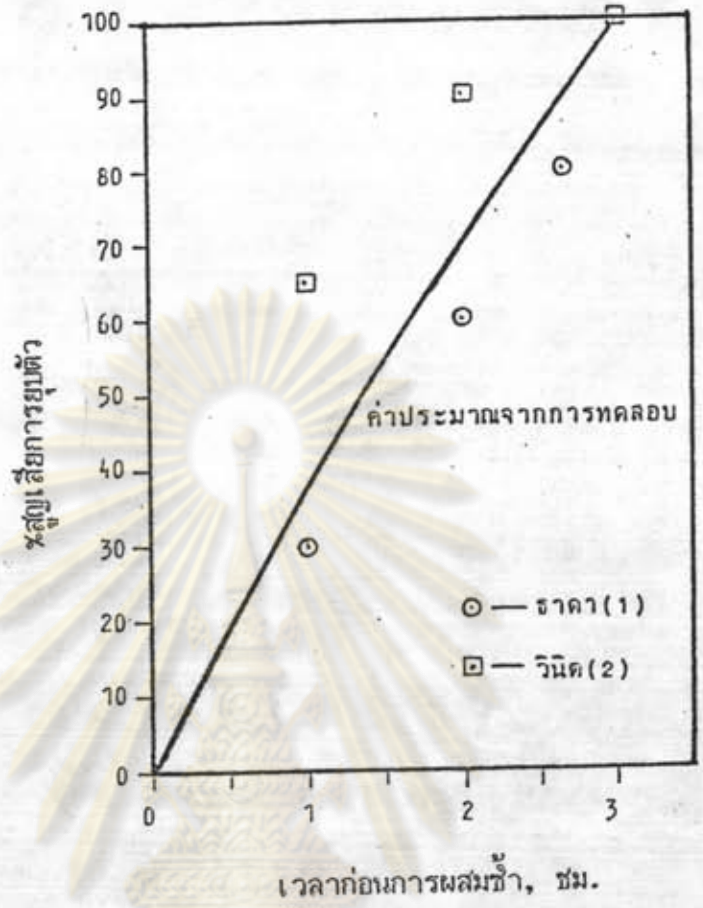
รูปที่ 3.4 ผลกระทบของปริมาณสารลดน้ำพิเศษต่อ เวลาก่อตัวสุดท้าย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



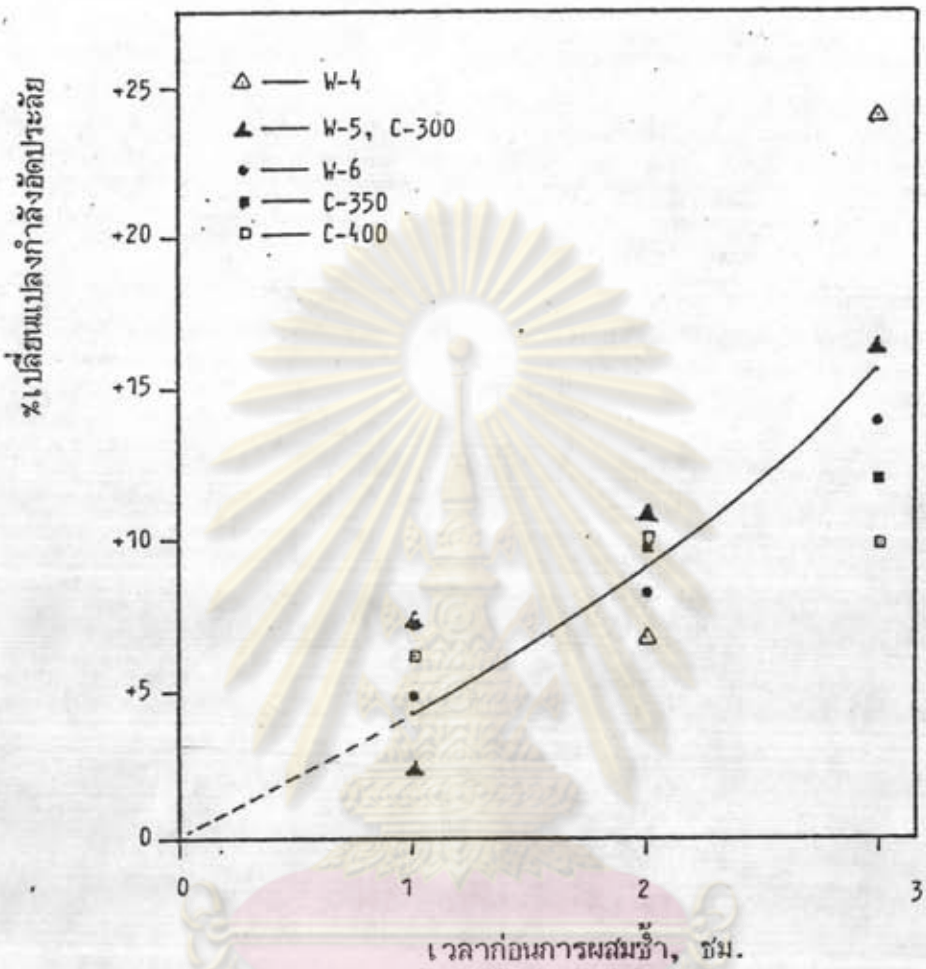
รูปที่ 3.5 การสูญเสียความสามารถเทได้ตามเวลาก่อนการผสมซ้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



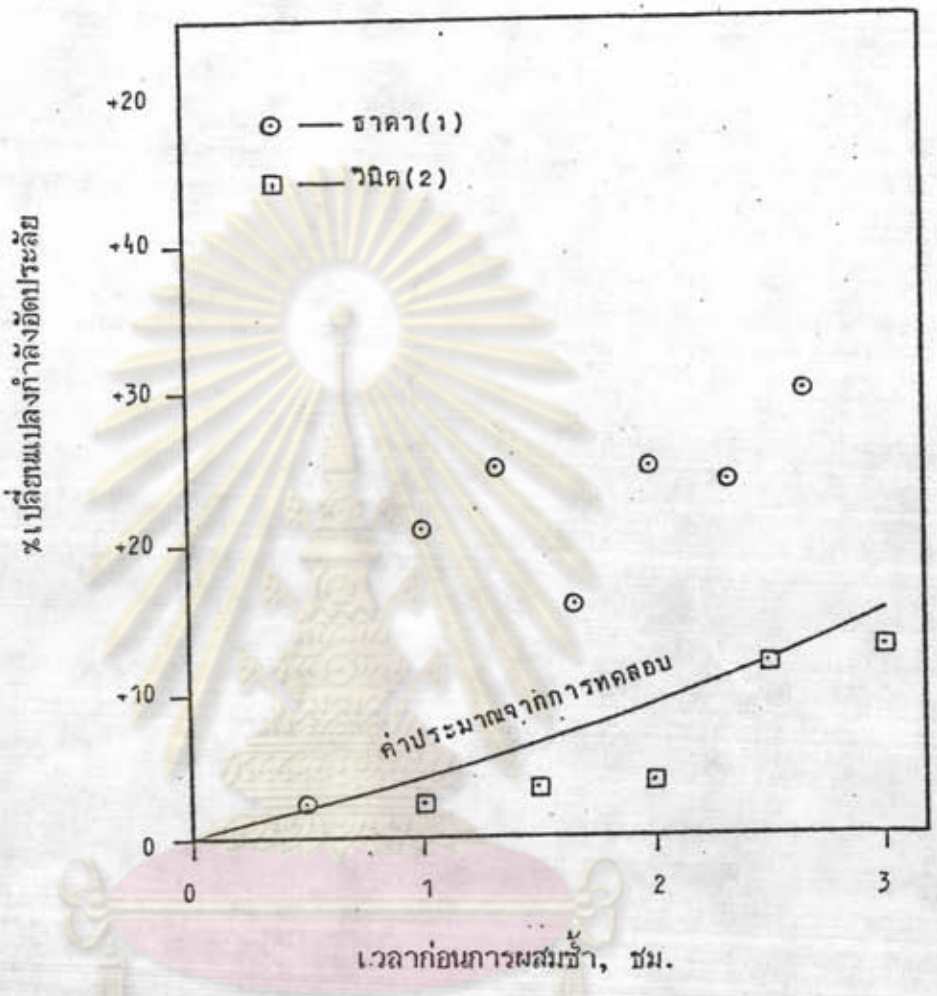
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบการสูญเสียการยุบตัวตามเวลาก่อนการผสมซ้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 กำลังอัดประลัยที่อายุ 28 วันตามเวลาก่อนการผสมซ้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบกำลังอัดประลัยที่อายุ 28 วันตามเวลาก่อนการผสมซ้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย