



#### 4.1. คำนำ

คุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงใน สภาพเหลวได้ศึกษาในด้านความสามารถในการทำงาน<sup>(35)</sup> ให้ค่าการยุบตัวมากกว่า 20 ซม., ค่าการไหลมากกว่า 50 ซม., ปริมาณอากาศในเนื้อคอนกรีต ระหว่าง 1.85 - 2.70 % มีระยะเวลาทำงานได้เกินกว่า 1½ ซม. นอกจากนี้ยังได้พิจารณาปรับปรุง ยืดระยะเวลาทำงานด้วยการใช้สารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้น 0.25 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติในสภาพความชื้นเหลวโดยการเติมสารผสมเพิ่มประเภท ซีเมนต์ลอยและไมโครซิลิกา โดยที่สามารถปรับความชื้นเหลวของคอนกรีตโดยค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 20 - 25 ซม.หรือด้วยค่าการไหลประมาณ 55 - 65 ซม., ปริมาณอากาศอยู่ในช่วง 1.18 - 1.70 % และระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นประมาณ ½ - 1 ชั่วโมงด้วยซีเมนต์ลอยในอัตรา 20 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และความชื้นเหลวของคอนกรีตลดลงในช่วง 17 - 22 ซม., การไหลตัวประมาณ 43 - 52 ซม. ด้วยการเพิ่มไมโครซิลิกา 10 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และมีผลกระทบต่อปริมาณอากาศในคอนกรีตน้อยมาก

จากส่วนผสมของคอนกรีตที่ได้คุณสมบัติในสภาพเหลวตามต้องการและตามข้อกำหนดเบื้องต้น ในการศึกษาจะพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็งตัว ทางด้านคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการก่อสร้าง การทดสอบจะครอบคลุมกำลังอัด , กำลังดึง , กำลังดัด, โมดูลัสยืดหยุ่น , อัตราส่วนพั่วของ, การซึมผ่านของน้ำ และการดูดซึมน้ำ โดยการทดสอบจะยึดถือตามมาตรฐานสากลเช่น ASTM., DIN. และ BS. เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อนำไปสู่การออกแบบส่วนผสมที่ใช้กำลังและความทนทานเป็นตัวควบคุม

#### 4.2. ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตออกเป็น 3 ชุดคือ ชุดที่ I คอนกรีตที่เพิ่มสารลดน้ำพิเศษ, ชุดที่ II คอนกรีตที่เพิ่มสารลดน้ำพิเศษร่วมกับซีเมนต์ลอยและ ชุดที่ III คอนกรีตที่เพิ่มสารลดน้ำพิเศษร่วมกับไมโครซิลิกา

4.2.1. ชุดที่ I ทำการทดสอบโดยการแปรเปลี่ยนปริมาณปูนซีเมนต์ในอัตรา 350, 400, 450, 500 และ 550 กก./ลบ.ม., ปริมาณน้ำที่ปริมาณ 120, 140 และ 160 กก./ลบ.ม., อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วง 0.22 - 0.46 และใช้สารลดน้ำพิเศษในอัตราเท่ากับ 1.20, 1.80 และ 2.40 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กก. ตามลำดับ โดยแบ่งเป็นกลุ่มย่อย A, B, C, D, E, F, G, H และ I แสดงในตารางที่ 4.1. - 4.9.

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตในกลุ่ม A, B, C, D, และ G มีค่าการยุบตัวน้อยกว่า 20 ซม. และค่าการไหลตัวต่ำกว่า 50 ซม., กลุ่ม E และ F มีค่าการยุบตัวประมาณ 20 - 25 ซม., การไหลตัวประมาณ 50 - 60 ซม. และคอนกรีตในกลุ่ม H และ I มีค่าการยุบตัวประมาณ 23 - 26, การไหลตัวประมาณ 57 - 63 ซม. เป็นตามกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูงในสภาพเหลว

ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต ศึกษาที่อายุ 1, 7 และ 28 วันตามลำดับ พบว่ากำลังอเมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษในอัตรา 1.80 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กก. ให้ค่ากำลังอัดโดยเฉลี่ยสูงกว่ากำลังอัดกลุ่มอื่นที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากันแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.4 และผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็งตัวนอกเหนือจากกำลังอัด โดยเลือกส่วนผสมของคอนกรีตในชุด C, F และ I แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.18. - 4.20.

4.2.2. ชุดที่ II โดยการเพิ่มสารปอซโซลาน ซีเถ้าลอย ด้วยวิธีการเพิ่ม (Addition Method) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถทำงานได้, ลดการเฝิ้มและการแยกตัว โดยออกแบบส่วนผสมที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 350, 400, 450, 500 และ 550 กก./ลบ.ม. เลือกปริมาณน้ำที่ 160 กก./ลบ.ม., สารลดน้ำพิเศษในอัตรา 1.80 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กก. และแปรเปลี่ยนอัตราการเพิ่มซีเถ้าลอยในอัตรา 15, 20, 25 และ 30 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มย่อยได้แก่ J, K, L และ M

ผลการทดสอบ ซีเถ้าลอยจะเพิ่มคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ โดยมีค่าการยุบตัวเฉลี่ยในช่วง 20 - 25 ซม. และการไหลตัวประมาณ 55 - 65 ซม., กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน ตามลำดับแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.10. - 4.13.

จากการทดสอบพบว่าซีเถ้าลอยจะเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต ที่อัตราการเพิ่มประมาณ 20 - 25 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ 1 และ 28 วัน เท่ากับ 350 และ 650 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และซีเถ้าลอย ต่ำกว่า 0.30 และผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็งตัวนอกเหนือจากกำลังอัด โดยการเพิ่มซีเถ้าลอยในอัตราการใช้ 20 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในส่วนผสมคอนกรีตกลุ่ม K แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.21.



4.2.3.ชุดที่ III โดยการเพิ่มสารปอซโซลาน ไมโครซิลิกา ด้วยวิธีการเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัด ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 350, 400, 450, 500 และ 550 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ, เลือกปริมาณน้ำที่ 160 กก./ลบ.ม., สารลดน้ำพิเศษในอัตรา 1.80 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กก. และแปรอัตราการเพิ่มไมโครซิลิกาในอัตรา 5, 10, 15 และ 20 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มย่อยได้แก่ N, O, P และ Q

จากผลการทดสอบ พบว่าไมโครซิลิกาช่วยปรับปรุงลดการซึมของคอนกรีต แต่จะมีผลทำให้ความชื้นเหลวลดลง โดยมีค่าการยุบตัวเฉลี่ยประมาณ 17 - 22 ซม. และการไหลตัวเฉลี่ยประมาณ 43 - 52 ซม. แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.14. - 4.17.

ผลการทดสอบกำลังอัดที่ 1, 7 และ 28 วัน พบว่าปริมาณไมโครซิลิกาที่ใช้ในอัตรา 20 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 965 กก./ตร.ซม. ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.29 และมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่ออัตราการไหลลดลง โดยอัตราการเพิ่ม 5, 10 และ 15 % จะมีค่ากำลังอัดที่ 764, 824 และ 937 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็งตัวนอกเหนือจากกำลังอัด โดยการเพิ่มไมโครซิลิกาในอัตราการไหล 10 % พิจารณากำลังอัดในช่วง 600 - 850 กก./ตร.ซม. ในส่วนผสมคอนกรีตกลุ่ม O แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 4.22.

#### 4.3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว

##### 4.3.1. กำลัง

กำลังของคอนกรีตถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในสภาพแข็งตัว โดยการศึกษาด้านกำลังสามารถพิจารณาได้หลายด้าน ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติของกำลังประกอบด้วย

##### กำลังอัด

กำลังอัดซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักในการควบคุมพฤติกรรมทางโครงสร้าง ซึ่งพฤติกรรมของกำลังอัดจะขึ้นกับ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์, ปริมาณปูนซีเมนต์, ปริมาณน้ำยาเคมีผสมเพิ่ม และอายุของคอนกรีต ซึ่งจะได้พิจารณาแยกแยะตามตัวแปรหลักดังนี้

### ก. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ถือเป็นตัวแปรอันสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังอัดโดยตรง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ผ่านข้อกำหนดในสภาพเหลวมาแล้ว ซึ่งพบว่าสัดส่วน หินเล็ก (3/8") ต่อหินกลาง (3/4") ที่ 40:60, สัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A) มีค่าเฉลี่ยที่ 0.45 แล้ว กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) และปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเป็นตัวแปร ในการทดสอบชุดที่ 1 โดยกำหนดให้ปริมาณปูนซีเมนต์เป็นตัวคงที่และแปรเปลี่ยนปริมาณน้ำในส่วนผสม 120, 140, 160 กก./ลบ.ม. ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วง 0.22 - 0.46 ทั้งนี้โดยควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 350, 400, 450, 500 และ 550 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ

จากผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ทั้งนี้ภายใต้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่พิจารณาและการไหลตามข้อกำหนด พบว่ากำลังของคอนกรีตมีความสัมพันธ์ผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงจากข้อกำหนดในช่วง 600 - 850 กก./ตร.ซม. พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงจากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.24 - 0.34 โดยความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ แสดงในรูปที่ 4.5.

### ข. ปริมาณปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้จะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตพิจารณาร่วมกับการไหลตัวตามข้อกำหนด แสดงในรูปที่ 4.6. โดยปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมจะได้กำลังอัดตามข้อกำหนด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์เทียบกับกำลังอัด ดังในสมการ

$$C = 0.831 f'_c - 86 \quad (4.2.)$$

เมื่อ

C	=	ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)
f'_c	=	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)

ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำให้กำลังอัดตามข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูงเริ่มที่ปริมาณปูนซีเมนต์ประมาณ 420 - 440 กก./ลบ.ม. เป็นการยืนยันปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้เริ่มต้นจากการพิจารณาปริมาณช่องว่างของมวลรวม

### ค. นํ้ายาเคมีผสมเพิ่ม

สารลดนํ้าพิเศษ (Superplasticizer) ที่ใช้ในส่วนผสมมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติในสภาพเหลวของคอนกรีต ในด้านการยุบตัวและการไหลตัว พิจารณาปริมาณสารลดนํ้าพิเศษเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนนํ้าต่อปูนซีเมนต์ต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.1. - 4.3. พบว่า อัตราการใช้สารลดนํ้าพิเศษจะมีผลน้อยมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต แต่จะมีผลต่อความสามารถทำงานได้ ที่อัตราการใช้สารลดนํ้าพิเศษประมาณ 1.80 ลิตร/ปูนซีเมนต์ 100 กก. ให้ค่ากำลังอัดโดยเฉลี่ยสูงกว่าค่าอื่นเมื่อใช้อัตราอื่น โดยอัตราส่วนนํ้าต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ควรมีค่าในช่วงระหว่าง 0.24 - 0.34 เพื่อให้กำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 600 กก./ตร.ซม.แสดงในรูปที่ 4.4.

### ง. อายุของคอนกรีต

อายุของคอนกรีตมีผลโดยตรงต่อปฏิริยาของการเกิดกำลังอัดในคอนกรีต กล่าวคือที่คอนกรีตอายุสูงจะมีกำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่อายุน้อย โดยผลการทดสอบของการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน พิจารณากับกำลังอัดในรูปที่ 4.4. พบว่า กำลังอัดที่ 1, 7 วัน จะมีค่าประมาณ 60 % และ 85 % ของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ

### กำลังดึง

กำลังดึงมีค่าประมาณ 10% ของกำลังอัดและมีความสำคัญน้อยต่อการออกแบบโครงสร้างในแง่ของกำลัง แต่จะมีความสำคัญอย่างมากในการควบคุมขนาดของรอยแตกร้าวรวมไปถึงความทนทานของโครงสร้าง การทดสอบจะพิจารณาจากการทดสอบแรงดึงแตกแยก (Splitting Tensile Strength) สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C - 496

จากการทดสอบกำลังดึงแตกแยกในงานวิจัยนี้ ได้แสดงในรูปที่ 4.7. พิจารณาเปรียบเทียบกับกำลังอัดและหาความสัมพันธ์ โดยวิธี Least Squares ในช่วงกำลังอัด 600 - 850 กก./ตร.ซม. ได้ดังสมการ

$$f_{sp} = 2.90 \sqrt{f'_c} - 6.65 \quad (4.2.)$$



เมื่อ	$f_{sp}$	=	กำลังดึงแตกแยก (กก./ตร.ซม.)
	$f'_c$	=	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)

จากกราฟได้เปรียบเทียบกำลังดึงกับ ACI 363<sup>(37)</sup> และ Imam<sup>(38)</sup> สำหรับคอนกรีตกำลังสูงพิจารณาในช่วง 210 - 830 กก./ตร.ซม. และ 700 - 1150 กก./ตร.ซม. พบว่าให้กำลังดึงแตกแยกในการทดสอบที่สูงกว่า และสอดคล้องเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของสุพรรณในคอนกรีตกำลังสูงที่ 500 - 900 กก./ตร.ซม. อันเป็นการยืนยันว่าคอนกรีตสมรรถนะสูงให้กำลังดึงแตกแยกมากกว่าคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป

### กำลังเฉือน

การทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงมีความยุ่งยากมาก งานวิจัยนี้ได้พิจารณาค่ากำลังเฉือนโดยวิธีของมอร์ (Mohr's Method) โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ของกำลังดึงแตกแยกและกำลังอัดของชุดตัวอย่างเดียวกันมาเขียนรูปครึ่งวงกลมบนแกนนอนของค่ากำลังอัดเป็นบวกและกำลังดึงเป็นลบ ตามลำดับ ดังนั้นกำลังเฉือนจะเป็นสมการกำลังสองหรือเป็นค่าบนแกนตั้งจากบนแกนตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.17. ด้วยการลากเส้นสัมผัสครึ่งวงกลมของกำลังอัดและกำลังดึง

สำหรับกำลังอัดในการทดสอบจาก 600 - 850 กก./ตร.ซม. จะให้ค่ากำลังเฉือนแตกต่างกันตามความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8. และแสดงสมการความสัมพันธ์จากวิธีของ Least Squares เขียนได้คือ

$$f_v = 5.96 \sqrt{f'_c} - 55 \quad (4.3.)$$

เมื่อ	$f_v$	=	กำลังเฉือน (กก./ตร.ซม.)
	$f'_c$	=	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังเฉือนกับ สุพรรณ<sup>(17)</sup> ที่ทำการทดสอบกำลังเฉือนในคอนกรีตกำลังสูงในช่วง 500 - 900 กก./ตร.ซม. พบว่ากำลังเฉือนของคอนกรีตสมรรถนะสูงมีค่าสูงกว่าคอนกรีตกำลังสูง

## กำลังดัด

การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีตทำตามมาตรฐาน ASTM C - 293 ด้วยคานคอนกรีตขนาด 15 x 15 x 60 ซม. ให้น้ำหนักกระทำที่จุดกึ่งกลางของแท่งคานทดสอบ ค่าหน่วยแรงดัดได้จากการคำนวณหน่วยแรงดึงที่จุดแตกร้าว ซึ่งอีกนัยหนึ่งคือค่าโมดูลัสของการแตกร้าว นั้นเองความสัมพันธ์เทียบกำลังดัดหรือโมดูลัสของการแตกร้าวกับกำลังอัดในช่วง 600 - 850 กก./ตร.ซม. ทำโดยวิธี Least Squares ดังสมการ

$$f_b = 6.12 \sqrt{f'_c} - 85 \quad (4.4.)$$

เมื่อ

$$f_b = \text{กำลังดัดหรือโมดูลัสของการแตกร้าว (กก./ตร.ซม.)}$$

$$f'_c = \text{กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)}$$

เปรียบเทียบค่ากำลังดัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงกับค่าของคอนกรีตกำลังสูงตาม ACI 363<sup>(37)</sup> และ Shah<sup>(39)</sup> แสดงในรูปที่ 4.9. พบว่าจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก และค่ากำลังดัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยเฉพาะที่มีกำลังสูงกว่า 700 กก./ตร.ซม. ในงานวิจัยนี้จะมีค่าสูงกว่ากำลังดัดในคอนกรีตกำลังสูง

## ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดและความเครียด ( Stress - Strain Curve )

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C - 469 จากการแท่งตัวอย่างทรงกระบอกขนาด  $\phi$  15 x 30 ซม. ที่อายุ 28 วัน และเครื่องมือ Compressometer - Extensometer ใช้ค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างของแท่งคอนกรีต โดยเริ่มวัดระยะการเปลี่ยนรูปร่างแกนตามหน่วยแรงอัดของตัวอย่างทดสอบจนถึงประมาณ 60 % ของกำลังอัด

เนื่องจากการทดสอบมีไม่มากพอ จึงมีอาจสร้างกราฟจากการทดสอบในการทดลองนี้โดยตรง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดและความเครียดของ Collins<sup>(40)</sup> หรือที่ได้รับการปรับปรุงให้สอดคล้องกับข้อมูลการทดสอบและศึกษาสำหรับคอนกรีตกำลังสูงในประเทศไทยของเสรี<sup>(41)</sup> ซึ่งเปรียบเทียบพบว่าความลาดชันสอดคล้องดีทั้งในช่วงต้นและช่วงกลาง แต่สำหรับช่วงปลายที่จุดสูงสุดของหน่วยแรงอัดไม่อาจวัดค่าความเครียดได้จากการ

ทดสอบนี้ แต่พอจะเปรียบเทียบความชันกับกำลังประลัยจะให้ค่าที่สอดคล้องกันมาก ซึ่งอาจพิจารณาขีดต่อสมการที่ปรับปรุงโดยเสรีเป็นตัวแทนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด โดยอิงจากค่ากำลังประลัย ( $f'_c$ ) จากการทดสอบกำลังอัดเป็นเกณฑ์ แสดงในสมการ

$$f_c = f'_c [ 2(\epsilon_c/\epsilon_u) - (\epsilon_c/\epsilon_u)^2 ], \text{ สำหรับ } 0 > \epsilon_c > \epsilon_u \quad (4.5.)$$

เมื่อ	$f_c$	=	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)
	$f'_c$	=	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)
	$\epsilon_c$	=	ความเครียดของคอนกรีต (ซม./ซม.)
	$\epsilon_u$	=	ความเครียดสูงสุดเมื่อ $f_c$ ถึง $f'_c$
	$\epsilon_u$	=	ความเครียดสูงสุด = 0.003 (ซม./ซม.)

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด แสดงตัวอย่างที่กำลังอัด 746 กก./ตร.ซม. ในรูปที่ 4.10. แยกเขียนสำหรับกำลังอัดต่างๆกัน แต่จะมีค่าเฉพาะในช่วงแรกประมาณร้อยละ 60 ของค่ากำลังอัดประลัย โดยผลการทดสอบความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดและความเครียดสามารถนำไปพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ต่อไป

#### ก. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสมรรถนะสูง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจากงานวิจัยนี้ สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้ และเมื่อใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเขียนกราฟเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.11. ซึ่งอาจพิจารณาเขียนสมการจากการทำ Least Square ดังแสดงในสมการ

$$E_c = 13,900 \sqrt{f'_c} - 18,710 \quad (4.6.)$$

เมื่อ	$E_c$	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
	$f'_c$	=	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)

อนึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสมรรถนะสูงในช่วงของกำลังอัดระหว่าง 600 - 850 กก./ตร.ซม. กับสูตรแนะนำโดย ACI 363<sup>(37)</sup>, CEB - FIP<sup>(42)</sup>, Nilson<sup>(43)</sup> และ



สุพรรณ<sup>(17)</sup> จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก และสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงจะให้ค่าสูงขึ้นเมื่อกำลังมากขึ้น เป็นการยืนยันว่าคอนกรีตสมรรถนะสูงให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อยที่กำลังสูงกว่าเพราะมีปริมาณช่องว่างในคอนกรีตน้อยกว่า

#### ข. อัตราส่วนพั่วของ

อัตราส่วนพั่วของสามารถทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C - 469 ด้วยการวัดความเครียดด้านข้างที่เปลี่ยนแปลงของแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด  $\phi$  15 x 30 ซม. เปรียบเทียบกับความเครียดในแนวแกน โดยค่าของอัตราส่วนพั่วของของคอนกรีตทั่วไปจะมีค่าระหว่าง 0.15 - 0.23<sup>(42)</sup>

จากผลการทดสอบค่าอัตราส่วนพั่วของเปรียบเทียบกับกำลังอัดแสดงในรูปที่ 4.12. พบว่าอัตราส่วนพั่วของของตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังอัดระหว่าง 600 - 850 กก./ตร.ซม. มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.19 - 0.24 อย่างไรก็ตามเป็นที่ยอมรับว่าค่าอัตราส่วนพั่วของที่กำลังอัดสูงกว่าจะมีค่าลดลง ซึ่งอาจจะพิจารณาเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์คือ

$$v = 0.354 - 0.0002 f'_c \quad (4.7.)$$

เมื่อ

$$v = \text{อัตราส่วนพั่วของ (ซม./ซม.)}$$

$$f'_c = \text{กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)}$$



#### 4.3.2. ความทนทาน

ความทนทานของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติแสดงผลในระยะยาวต่อพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีต เพื่อให้อายุใช้งานได้ยาวนานตามสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติของวัสดุและโดยทางอ้อมด้วยพฤติกรรมทางโครงสร้าง อันสืบเนื่องจากคุณสมบัติเกี่ยวกับกำลังและน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำ ในงานวิจัยนี้จะเน้นเฉพาะพฤติกรรมจากคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยตรง ประกอบด้วย

## การซึมผ่านของน้ำ

การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตถือเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเรียงตัวของอนุภาคภายในของคอนกรีตและขึ้นอยู่กับความพรุนหรือความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีตภายใน การทดสอบทำตามมาตรฐานของ DIN 1048 โดยให้น้ำที่ความดันสูงผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด  $15 \times 15 \times 7.5$  ซม. ตามระยะเวลาที่กำหนดตามมาตรฐานในสภาวะอิ่มตัวของปริมาณน้ำที่ซึมผ่านในช่วงระยะเวลา สามารถแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ,  $k$  โดยพิจารณาจากการซึมผ่านของน้ำในแท่งตัวอย่างคอนกรีต หาความสัมพันธ์โดยแทนในสมการที่ 2.9. และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยการรวมผลจากความสัมพันธ์ของการซึมผ่านในแท่งตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลาที่ความดันต่างกัน พบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.13.

ค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตสมรณะสูงในงานวิจัยนี้แสดงความสัมพันธ์โดยใช้ Power Method แสดงดังสมการ

$$k = 81.36 (w/c)^{3.29} \times 10^{-06} \quad (4.8.)$$

เมื่อ  $k$  = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (ม./วินาที)  
 $w/c$  = อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตสมรณะสูงมีค่าอยู่ระหว่าง  $1 \times 10^{-06}$  -  $4 \times 10^{-06}$  ม./วินาที และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดต่ำลง แสดงถึงการเรียงตัวของเนื้อคอนกรีตสมรณะสูงมีการต่อเนื่องของช่องว่างลดน้อยลง

## การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำแสดงถึงความสามารถของคอนกรีตในการดูดซึมน้ำที่สภาพปกติ จากการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ของการดูดซึมน้ำเทียบกับกำลังอัด แสดงในรูปที่ 4.14. พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตสมรณะสูงจะมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ในช่วง 1.70 - 2.10 % หรือประมาณ 1.94 % โดยเฉลี่ยซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป แสดงความสัมพันธ์เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตแสดงในสมการ

$$\% \text{ Absopr.} = 2.32 - 0.0006 f'_c \quad (4.9.)$$

เมื่อ	% Absopr.	=	การดูดซึมน้ำของคอนกรีต (ม./วินาที)
	$f'_c$	=	กำลังอัด (กก./ตร.ซม)

#### 4.4. การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยสารปอซโซลาน ซีเถ้าลอยและไมโครซิลิกา

ส่วนผสมคอนกรีตในชุดที่ I เมื่อทำการเพิ่มปริมาณน้ำและสารลดน้ำพิเศษในอัตราการใช้เพิ่มขึ้น มีผลทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวหรือการเยิ้มที่ผิวของคอนกรีตลดลง ในงานวิจัยนี้จึงใช้สารซีเถ้าลอยและไมโครซิลิกาในส่วนผสมคอนกรีตชุดที่ II และ III เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตพิจารณาด้านความสามารถทำงานได้และกำลัง ประกอบด้วย

##### ความสามารถทำงานได้

จากการทดสอบพบว่าซีเถ้าลอยจะช่วยเพิ่มความชื้นเหลือของคอนกรีต โดยการเพิ่มความชื้นเหลือตามอัตราการใช้ที่เพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.15. โดยลักษณะของคอนกรีตมีการยึดเหนี่ยวของเนื้อคอนกรีตสูงขึ้น โดยพิจารณาจากการไหลตัวของคอนกรีต

ผลการทดสอบของไมโครซิลิกาจะมีผลทำให้ค่าความชื้นเหลือลดต่ำลง โดยการไหลตัวจะมีค่าลดลงตามอัตราการใช้เพิ่ม แสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.16. แต่ไมโครซิลิกาก็จะช่วยลดการเยิ้มและการแยกตัวของคอนกรีต เนื่องจากการเพิ่มการยึดเหนี่ยวในเนื้อคอนกรีตให้สูงขึ้น

##### กำลังและความทนทาน

จากผลการทดสอบโดยการเพิ่มซีเถ้าลอยจะช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตพิจารณาที่คอนกรีตอายุ 28 วัน มีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 15 % เมื่อใช้ซีเถ้าลอยในอัตรา 20 - 25% ของปูนซีเมนต์ แสดงในรูปที่ 4.17. และไมโครซิลิกาก็ช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 4.18. ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่างกัน และเพิ่มกำลังอัดประมาณ 15 % เมื่อใช้สารไมโครซิลิกาในอัตรา 10 % ของปูนซีเมนต์แสดงในรูปที่ 4.19. ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และสารเติม ในรูปที่ 4.20. และ 4.21.

จากการเพิ่มสารปอซโซลานในส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติอื่นในคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยการเพิ่มไมโครซิลิกาก็ให้ผลในการเพิ่มคุณสมบัติสูงกว่าคอนกรีตสมรรถนะสูงในชุดที่ I และคอนกรีตในชุดที่ II แสดงในรูปที่ 4.22. - 4.28.



#### 4.5. การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงจากงานวิจัย

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัยนี้ ได้จากผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแห้งตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นแนวทางในการกำหนด โดยพิจารณาคุณสมบัติด้านกำลังและความทนทานของคอนกรีตเป็นหลัก และคุณสมบัติในสภาพเหลวได้ตามข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูง ด้วยการกำหนดแนวทางการออกแบบ แสดงในรูปที่ 4.29. โดยพิจารณาจากกำลังอัดของคอนกรีตตามข้อกำหนดระหว่าง 600 - 750 กก./ตร.ซม. เป็นค่ากำลังอัดในขอบเขตต่ำสุด (Lower Limit) ที่ต้องการ, ขนาดของมวลรวมที่เหมาะสมโดยพิจารณาในรูปของโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม พิจารณาจากรูปที่ 3.12., อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์กำหนดจากความสัมพันธ์กับกำลังอัดตามข้อกำหนดและมีการไหลตัวตามคุณสมบัติในสภาพเหลว, ปริมาณปูนซีเมนต์ กำหนดความสัมพันธ์กับกำลังอัดจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.6. โดยใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง, อัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษ พิจารณาตัวแทนการไหลตัวจากการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.1. - 4.3. และทำการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลัง โดยพิจารณาการเพิ่มกำลังอัดจากข้อกำหนด 600 กก./ตร.ซม. และปรับปรุงความสามารถทำงานได้ โดยพิจารณาจากการเพิ่มการไหลตัวของคอนกรีตจากข้อกำหนด 50 ซม. โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบดังนี้ :-

##### ขั้นตอนที่ 1. กำหนดกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูง ในช่วง 600 - 750 กก./ตร.ซม.

##### ขั้นตอนที่ 2. เลือกวัสดุมวลรวม

การตรวจสอบเพื่อควบคุมคุณภาพขนาดผลของมวลรวมให้ได้ตามมาตรฐานตามที่ต้องการ โดยมีขอบเขตที่กำหนด

สัดส่วนทรายต่อมวลรวม	0.43 - 0.47
โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ	6.32 - 6.74
โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียด	2.62 - 3.25

##### ขั้นตอนที่ 3. เลือกค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

หาค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต แสดงในรูปที่ 4.30.

#### ขั้นตอนที่ 4. กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์

หาค่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาความสัมพันธ์กับกำลังอัด โดยกำหนดจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.31.

#### ขั้นตอนที่ 5. กำหนดปริมาณน้ำยาเคมีผสมเพิ่ม

เลือกปริมาณการใช้น้ำยาเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer Admixture) โดยพิจารณาจากคุณสมบัติด้านการไหลตัวของคอนกรีตกำหนดอัตราการใช้ในรูปที่ 4.32.

#### ขั้นตอนที่ 6. คำนวณส่วนผสมที่ใช้จากขั้นตอนที่ 1 - 5

คำนวณส่วนผสมในคอนกรีต โดยพิจารณาจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิต

การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง สามารถใช้สารปอซโซลานในการปรับปรุงคุณสมบัติในด้านกำลังอัดและความสามารถเทได้ ดังนี้

ก. กำลังอัด ไซโมโครซิลิกาปรับปรุงคุณสมบัติในการเพิ่มกำลังอัด แต่จะมีผลต่อการลดความชื้นเหลือของคอนกรีต โดยกำหนดอัตราการเพิ่มสารไซโมโครซิลิกาจากความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเพิ่มกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ แสดงในรูปที่ 4.33.

ข. ความสามารถทำงานได้ ไซซีเถ้าลอยในการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ในรูปการไหลตัว โดยกำหนดอัตราการเพิ่มสารซีเถ้าลอยจากความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเพิ่มการไหลตัวกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ แสดงในรูปที่ 4.34.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.1. ผลการทดสอบ กลุ่ม A

Code	Cement kgs.	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/c	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
										1 day	7 days	28 days
A1	350	120	890	1090	4.20	7.50	26.5	0.34	0.45	312	458	575
A2	400	120	870	1070	4.80	8.00	27.0	0.30	0.45	402	548	652
A3	450	120	850	1050	5.40	10.00	27.5	0.27	0.45	412	579	712
A4	500	120	830	1025	6.00	11.00	29.0	0.24	0.45	418	626	788
A5	550	120	810	1000	6.60	10.00	28.0	0.22	0.45	457	655	867

ตารางที่ 4.2. ผลการทดสอบ กลุ่ม B

Code	Cement kgs.	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/c	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
										1 day	7 days	28 days
B1	350	140	890	1090	4.20	13.50	37.5	0.40	0.45	250	354	469
B2	400	140	870	1070	4.80	15.00	39.0	0.35	0.45	298	412	576
B3	450	140	890	1050	5.40	14.00	39.0	0.31	0.45	352	459	658
B4	500	140	830	1025	6.00	15.50	42.0	0.28	0.45	396	551	743
B5	550	140	810	1000	6.60	15.00	41.0	0.25	0.45	402	574	816

ตารางที่ 4.3. ผลการทดสอบ กลุ่ม C

Code	Cement kgs.	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/c	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
										1 day	7 days	28 days
C1	350	160	890	1090	4.20	16.50	43.0	0.46	0.45	212	306	412
C2	400	160	870	1070	4.80	17.00	44.5	0.40	0.45	243	352	487
C3	450	160	850	1050	5.40	18.00	46.0	0.36	0.45	295	448	572
C4	500	160	830	1025	6.00	17.50	46.5	0.32	0.45	348	578	653
C5	550	160	810	1000	6.60	16.00	46.5	0.29	0.45	388	598	738



ตารางที่ 4.4. ผลการทดสอบ กลุ่ม D

Code	Cement kgs.	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/c	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
										1 day	7 days	28 days
D1	350	120	890	1090	6.30	13.00	35.0	0.34	0.45	326	478	580
D2	400	120	870	1070	7.20	15.00	37.0	0.30	0.45	389	565	678
D3	450	120	850	1050	8.10	16.00	36.5	0.27	0.45	445	646	761
D4	500	120	830	1025	9.00	15.00	37.0	0.24	0.45	462	712	812
D5	550	120	810	1000	9.90	15.50	38.0	0.22	0.45	487	752	853

ตารางที่ 4.5. ผลการทดสอบ กลุ่ม E

Code	Cement kgs.	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/c	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
										1 day	7 days	28 days
E1	350	140	890	1090	6.30	20.00	50.0	0.40	0.45	287	425	494
E2	400	140	870	1070	7.20	21.00	52.0	0.35	0.45	317	479	587
E3	450	140	850	1050	8.10	21.50	52.5	0.31	0.45	375	553	669
E4	500	140	830	1025	9.00	21.00	53.0	0.28	0.45	452	602	744
E5	550	140	810	1000	9.90	22.00	54.0	0.25	0.45	479	668	825

ตารางที่ 4.6. ผลการทดสอบ กลุ่ม F

Code	Cement kgs.	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/c	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
										1 day	7 days	28 days
F1	350	160	890	1090	6.30	22.00	53.0	0.46	0.45	253	349	435
F2	400	160	870	1070	7.20	23.00	54.5	0.40	0.45	288	427	499
F3	450	160	850	1050	8.10	22.50	54.0	0.36	0.45	302	465	587
F4	500	160	830	1025	9.00	23.00	55.0	0.32	0.45	366	538	659
F5	550	160	810	1000	9.90	24.00	56.0	0.29	0.45	412	575	746

ตารางที่ 4.7. ผลการทดสอบ กลุ่ม G

Code	Cement kgs.	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/c	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
										1 day	7 days	28 days
G1	350	120	890	1090	8.40	17.50	45.5	0.34	0.45	318	446	589
G2	400	120	870	1070	9.60	17.00	45.0	0.30	0.45	338	528	680
G3	450	120	850	1050	10.80	18.50	47.0	0.27	0.45	407	552	726
G4	500	120	830	1025	12.00	19.00	48.0	0.24	0.45	458	621	812
G5	550	120	810	1000	13.20	18.50	46.5	0.22	0.45	472	689	852

ตารางที่ 4.8. ผลการทดสอบ กลุ่ม H

Code	Cement kgs.	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/c	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
										1 day	7 days	28 days
H1	350	140	890	1090	8.40	23.50	57.0	0.40	0.45	250	385	468
H2	400	140	870	1070	9.60	24.00	58.5	0.35	0.45	297	440	577
H3	450	140	850	1050	10.80	24.00	59.0	0.31	0.45	350	498	653
H4	500	140	830	1025	12.00	24.50	59.0	0.28	0.45	391	541	712
H5	550	140	810	1000	13.20	25.00	61.0	0.25	0.45	422	628	811

ตารางที่ 4.9. ผลการทดสอบ กลุ่ม I

Code	Cement kgs.	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/c	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
										1 day	7 days	28 days
I1	350	160	890	1090	8.40	25.00	59.5	0.46	0.45	208	315	428
I2	400	160	870	1070	9.60	26.00	61.0	0.40	0.45	248	395	504
I3	450	160	850	1050	10.80	25.50	62.0	0.36	0.45	295	420	563
I4	500	160	830	1025	12.00	26.00	62.0	0.32	0.45	352	492	644
I5	550	160	810	1000	13.20	26.50	63.0	0.29	0.45	387	549	712

ตารางที่ 4.10. ผลการทดสอบ กลุ่ม J ( ซีเมนต์ล้อย 15 % )

Code	C kgs.	FA kgs	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/ (c+f)	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
											1 day	7 days	28 days
J1	350	53	160	866	1061	7.25	23.00	58.0	0.40	0.45	268	379	503
J2	400	60	160	843	1037	8.28	23.50	59.0	0.35	0.45	309	448	597
J3	450	68	160	820	1013	9.32	24.00	57.0	0.31	0.45	399	502	654
J4	500	75	160	796	984	10.35	25.00	60.0	0.28	0.45	411	561	726
J5	550	83	160	773	955	11.39	25.50	62.0	0.25	0.45	452	603	763

ตารางที่ 4.11. ผลการทดสอบ กลุ่ม K ( ซีเมนต์ล้อย 20% )

Code	C kgs.	FA kgs	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/ (c+f)	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
											1 day	7 days	28 days
K1	350	70	160	859	1052	7.56	24.50	59.5	0.38	0.45	287	389	518
K2	400	80	160	834	1026	8.64	25.00	60.0	0.33	0.45	305	452	612
K3	450	90	160	810	1001	9.72	24.50	62.0	0.30	0.45	378	534	698
K4	500	10	160	785	970	10.80	25.50	63.0	0.27	0.45	421	563	732
K5	550	11	160	761	940	11.88	26.00	62.0	0.24	0.45	468	598	745

ตารางที่ 4.12. ผลการทดสอบ กลุ่ม L ( ซีเมนต์ล้อย 25% )

Code	C kgs.	FA kgs	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/ (c+f)	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
											1 day	7 days	28 days
L1	350	88	160	851	1042	7.88	24.50	61.0	0.37	0.45	275	402	490
L2	400	10	160	825	1015	9.00	25.00	61.5	0.32	0.45	348	499	601
L3	450	11	160	799	988	10.13	25.00	64.0	0.28	0.45	401	567	664
L4	500	12	160	774	956	11.25	26.00	63.0	0.26	0.45	440	603	742
L5	550	13	160	748	924	12.38	26.00	67.0	0.23	0.45	459	675	776



ตารางที่ 4.13. ผลการทดสอบ กลุ่ม M ( ซีเมนต์ 30 % )

Code	C kgs.	FA kgs	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/ (c+f)	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
											1 day	7 days	28 days
M1	350	105	160	851	1042	7.88	25.00	62.0	0.35	0.45	302	445	562
M2	400	120	160	825	1015	9.00	26.00	62.0	0.31	0.45	345	533	589
M3	450	135	160	799	988	10.13	25.00	64.5	0.27	0.45	411	605	675
M4	500	150	160	774	956	11.25	25.50	66.0	0.25	0.45	425	638	755
M5	550	165	160	748	924	12.38	26.50	67.0	0.22	0.45	444	678	787

ตารางที่ 4.14. ผลการทดสอบ กลุ่ม N ( ไมโครซิลิกา 5 % )

Code	C kgs.	MS kgs	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/ (c+s)	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
											1 day	7 days	28 days
N1	350	18	160	882	1080	6.62	21.00	46.0	0.44	0.45	299	410	487
N2	400	20	160	861	1059	7.56	22.50	46.5	0.38	0.45	341	472	579
N3	450	23	160	840	1038	8.51	20.00	49.0	0.34	0.45	416	549	642
N4	500	25	160	819	1011	9.45	21.50	52.0	0.30	0.45	514	644	725
N5	550	28	160	798	985	10.40	21.00	50.0	0.28	0.45	609	663	764

ตารางที่ 4.15. ผลการทดสอบ กลุ่ม O ( ไมโครซิลิกา 10 % )

Code	C kgs.	MS kgs	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/ (c+s)	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
											1 day	7 days	28 days
O1	350	35	160	874	1071	6.93	21.00	45.0	0.42	0.45	308	469	548
O2	400	40	160	852	1048	7.92	20.00	47.0	0.36	0.45	378	547	624
O3	450	45	160	830	1025	8.91	19.00	48.0	0.32	0.45	461	613	702
O4	500	50	160	808	998	9.90	21.00	50.0	0.29	0.45	484	673	776
O5	550	55	160	785	970	10.89	21.00	51.0	0.26	0.45	594	714	824

ตารางที่ 4.16. ผลการทดสอบ กลุ่ม P ( ไมโครซิลิกา 15 % )

Code	C kgs.	MS kgs	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/ (c+s)	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
											1 day	7 days	28 days
P1	350	53	160	866	1061	7.25	20.00	45.5	0.40	0.45	375	519	603
P2	400	60	160	843	1037	8.28	19.00	45.0	0.35	0.45	418	589	667
P3	450	68	160	820	1013	9.32	17.00	48.0	0.31	0.45	508	644	742
P4	500	75	160	796	984	10.35	20.00	50.0	0.28	0.45	542	721	834
P5	550	83	160	773	955	11.39	19.00	49.5	0.25	0.45	568	802	937

ตารางที่ 4.17. ผลการทดสอบ กลุ่ม Q ( ไมโครซิลิกา 20 % )

Code	C kgs.	MS kgs	Water kgs.	Sand kgs.	Agg. kgs.	Admix litres.	Slump cm.	Flow cm.	w/ (c+s)	S/A	Comp. Strength ( ksc.)		
											1 day	7 days	28 days
Q1	350	70	160	859	1052	7.56	20.00	43.0	0.38	0.45	380	541	644
Q2	400	80	160	834	1026	8.64	18.50	45.0	0.33	0.45	482	638	721
Q3	450	90	160	810	1001	9.72	19.00	47.5	0.30	0.45	497	663	779
Q4	500	10	160	785	970	10.80	18.00	48.0	0.27	0.45	520	725	912
Q5	550	11	160	761	940	11.88	17.00	47.0	0.24	0.45	634	834	965

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.18. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว กลุ่ม C

Code	Comp. Strength ksc.	w/c	Tensile Strength ksc.	Shear Strength ksc.	Flexural Strength ksc.	Modulus of Elasticity $\times 10^5$ ksc.	Poisson Ratio cm./cm.	Coeff. of Permeability $\times 10^{-6}$ m./sec.	Absorption %
C1	412	0.46	43.22	60.72	50.73	2.65	0.23	1.82	2.43
C2	487	0.40	53.68	72.19	60.68	2.80	0.24	2.72	2.30
C3	572	0.36	58.32	82.08	67.20	2.78	0.20	6.78	2.04
C4	653	0.32	60.49	85.61	72.91	3.15	0.24	6.28	2.10
C5	738	0.29	62.56	88.95	76.76	3.28	0.21	4.31	1.98

ตารางที่ 4.19. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว กลุ่ม F

Code	Comp. Strength ksc.	w/c	Tensile Strength ksc.	Shear Strength ksc.	Flexural Strength ksc.	Modulus of Elasticity $\times 10^5$ ksc.	Poisson Ratio cm./cm.	Coeff. of Permeability $\times 10^{-6}$ m./sec.	Absorption %
F1	435	0.46	56.08	77.71	53.14	2.78	0.23	6.15	2.12
F2	499	0.40	62.73	87.08	63.76	3.36	0.24	3.05	1.98
F3	587	0.36	66.16	92.54	70.48	3.59	0.16	3.50	1.88
F4	659	0.32	72.80	101.96	76.46	2.82	0.22	1.03	1.71
F5	746	0.29	80.18	112.48	80.41	4.01	0.21	0.95	1.75

ตารางที่ 4.20. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว กลุ่ม I

Code	Comp. Strength ksc.	w/c	Tensile Strength ksc.	Shear Strength ksc.	Flexural Strength ksc.	Modulus of Elasticity $\times 10^5$ ksc.	Poisson Ratio cm./cm.	Coeff. of Permeability $\times 10^{-6}$ m./sec.	Absorption %
I1	428	0.46	46.14	64.72	48.31	2.80	0.20	6.15	2.50
I2	504	0.40	56.74	79.37	57.96	3.15	0.23	7.93	2.20
I3	563	0.36	65.54	91.48	64.00	3.55	0.26	6.21	2.30
I4	644	0.32	69.01	97.62	69.51	4.08	0.22	6.81	1.98
I5	712	0.29	71.28	100.43	73.10	3.57	0.19	7.77	2.10



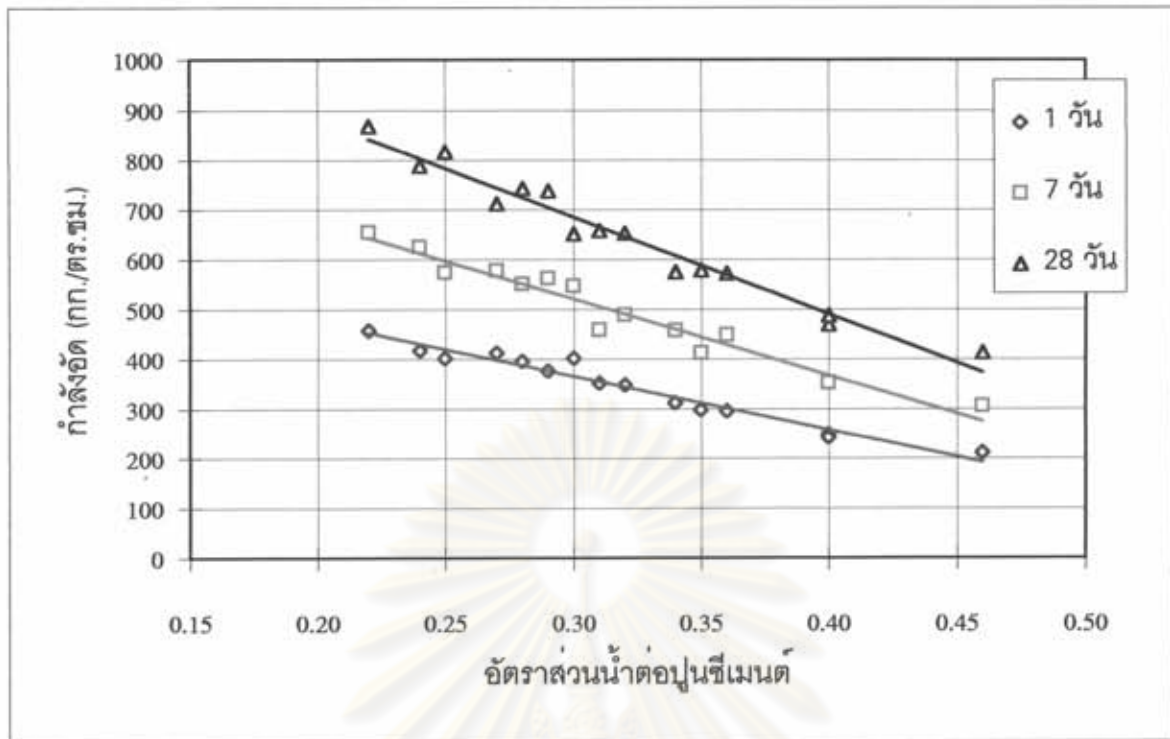
ตารางที่ 4.21. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแห้งตัว กลุ่ม K

Code	Comp. Strength ksc.	w/c+f	Tensile Strength ksc.	Shear Strength ksc.	Flexural Strength ksc.	Modulus of Elasticity $\times 10^5$ ksc.	Poisson Ratio cm./cm.	Coeff. of Permeability $\times 10^{-6}$ m./sec.	Absorption %
K1	518	0.38	53.51	75.25	51.70	3.42	0.17	4.38	2.10
K2	612	0.33	66.46	93.17	65.35	3.21	0.21	3.46	2.04
K3	698	0.36	72.20	101.53	73.10	3.39	0.20	1.67	1.94
K4	732	0.27	74.89	105.39	80.23	3.65	0.21	1.30	2.00
K5	745	0.24	77.45	108.89	85.20	3.61	0.21	1.18	1.74

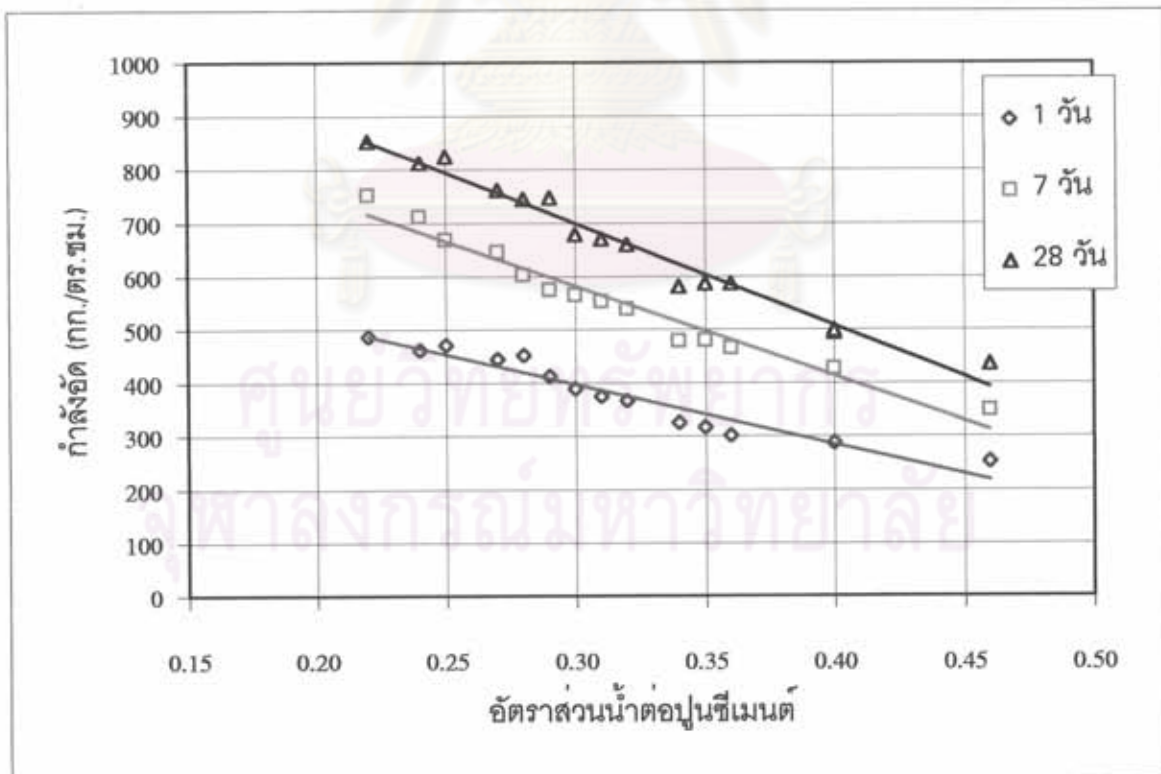
ตารางที่ 4.22. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแห้งตัว กลุ่ม O

Code	Comp. Strength ksc.	w/c+s	Tensile Strength ksc.	Shear Strength ksc.	Flexural Strength ksc.	Modulus of Elasticity $\times 10^5$ ksc.	Poisson Ratio cm./cm.	Coeff. of Permeability $\times 10^{-6}$ m./sec.	Absorption %
O1	548	0.42	59.98	84.06	62.80	2.75	0.29	3.56	2.30
O2	624	0.36	73.76	102.85	75.35	3.15	0.24	3.33	2.10
O3	702	0.32	85.20	118.56	83.20	3.47	0.20	1.16	1.80
O4	776	0.29	90.49	126.29	90.36	4.31	0.18	1.05	1.84
O5	824	0.26	92.66	129.63	95.03	4.02	0.19	1.22	1.79

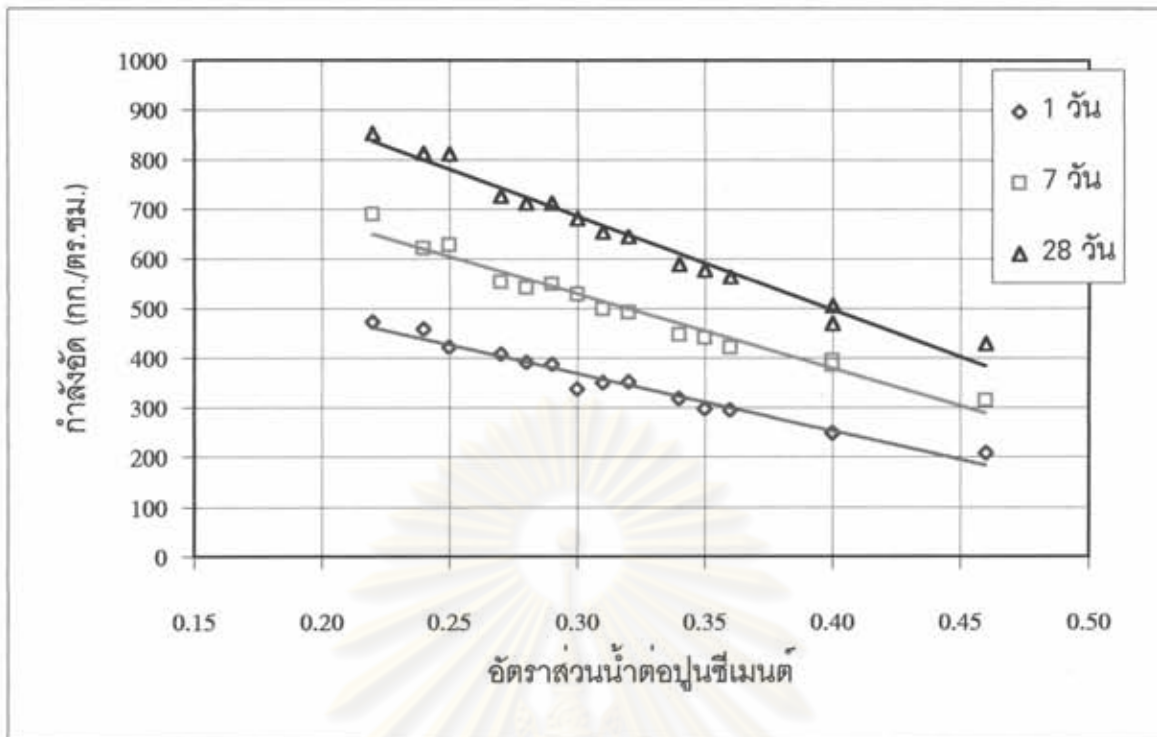
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



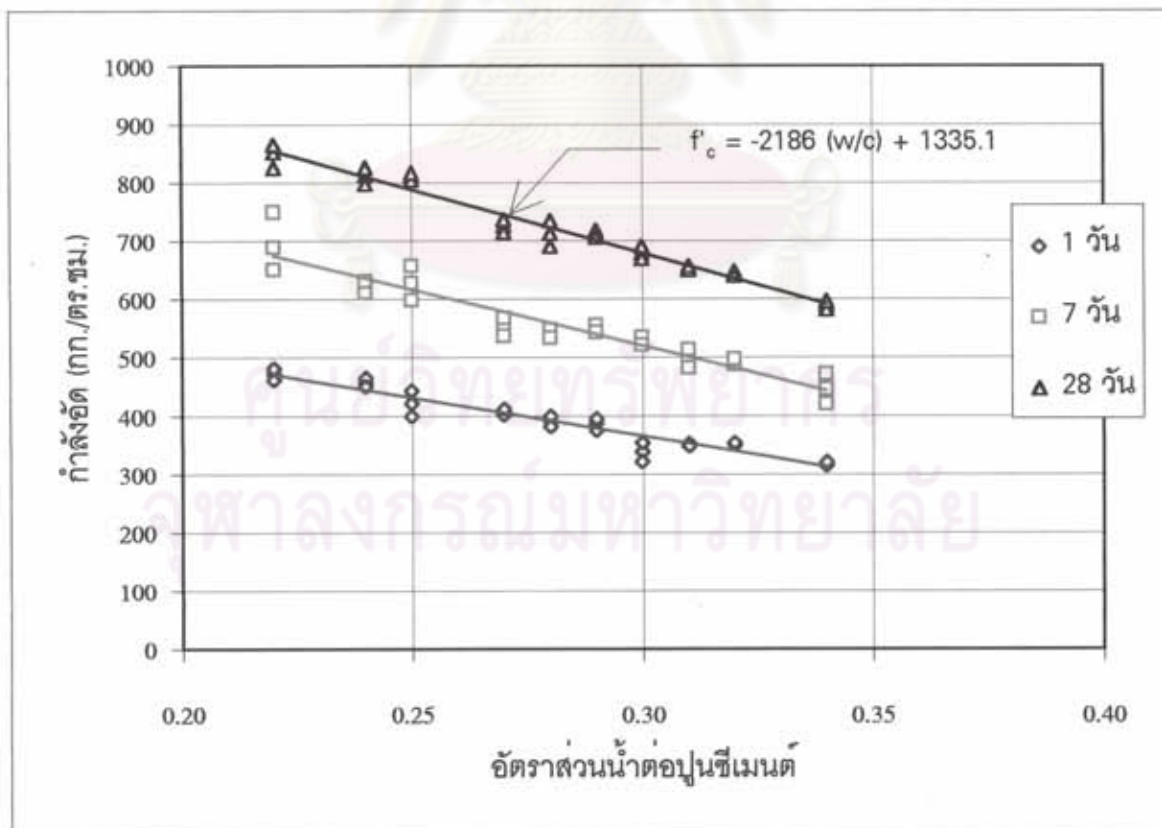
รูปที่ 4.1. กำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 1.20 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กก.



รูปที่ 4.2. กำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 1.80 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กก.

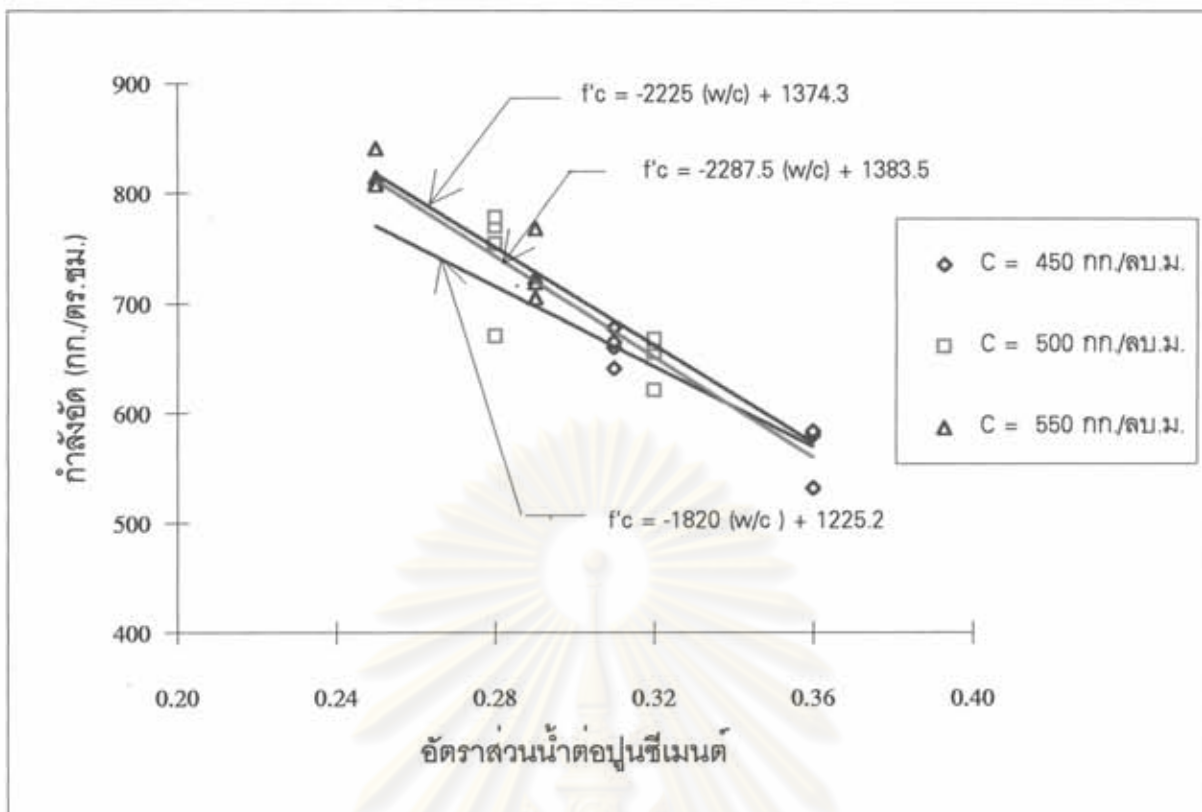


รูปที่ 4.3. กำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 2.40 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กก.

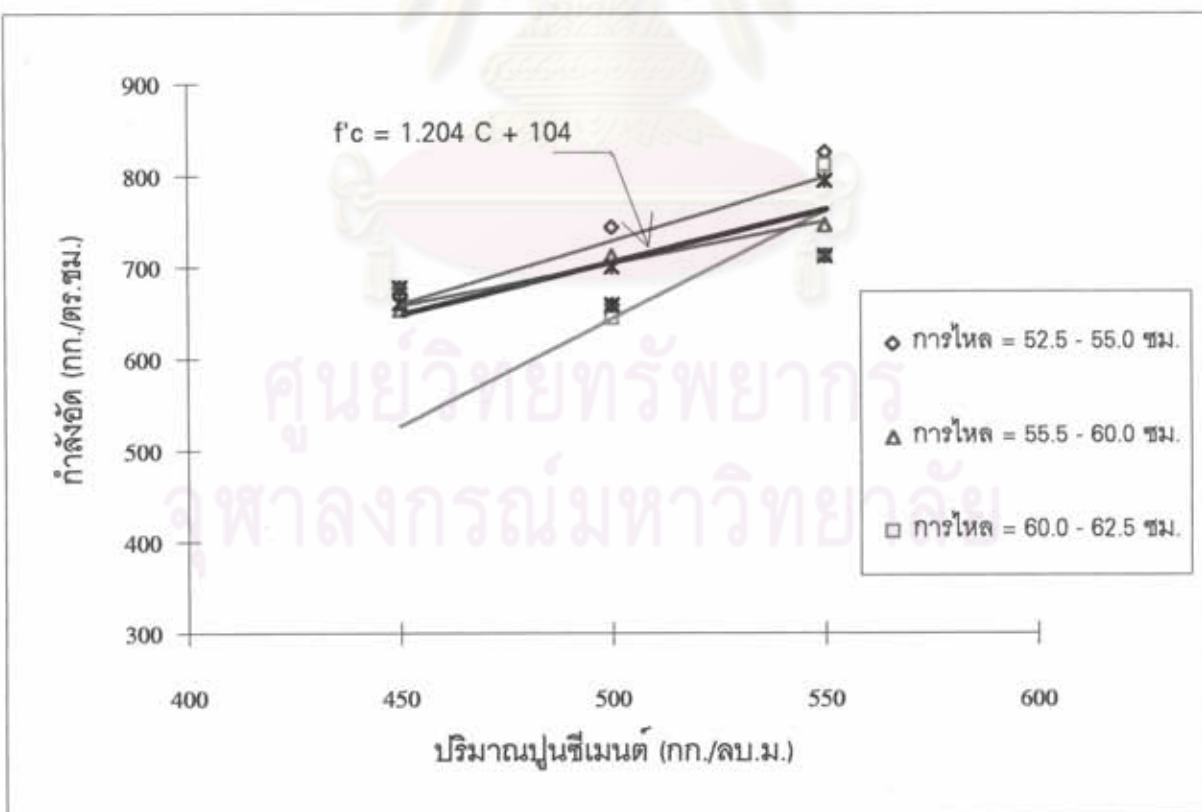


รูปที่ 4.4. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

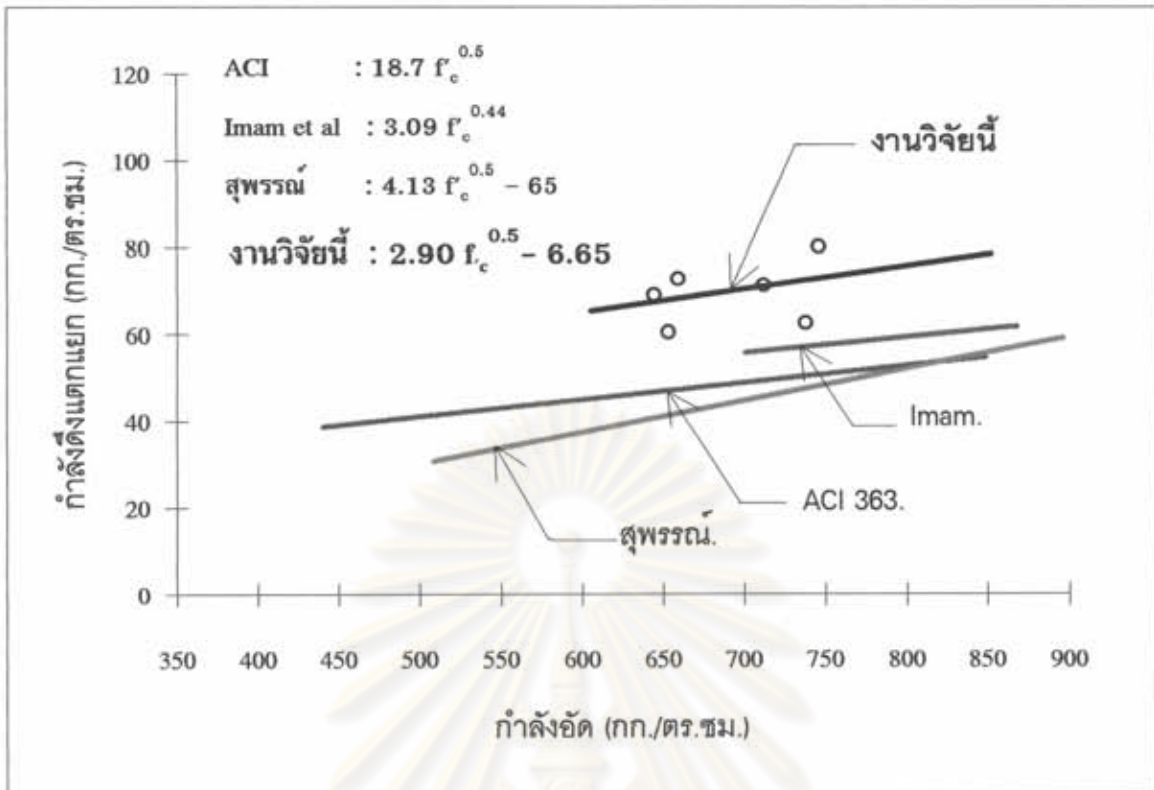




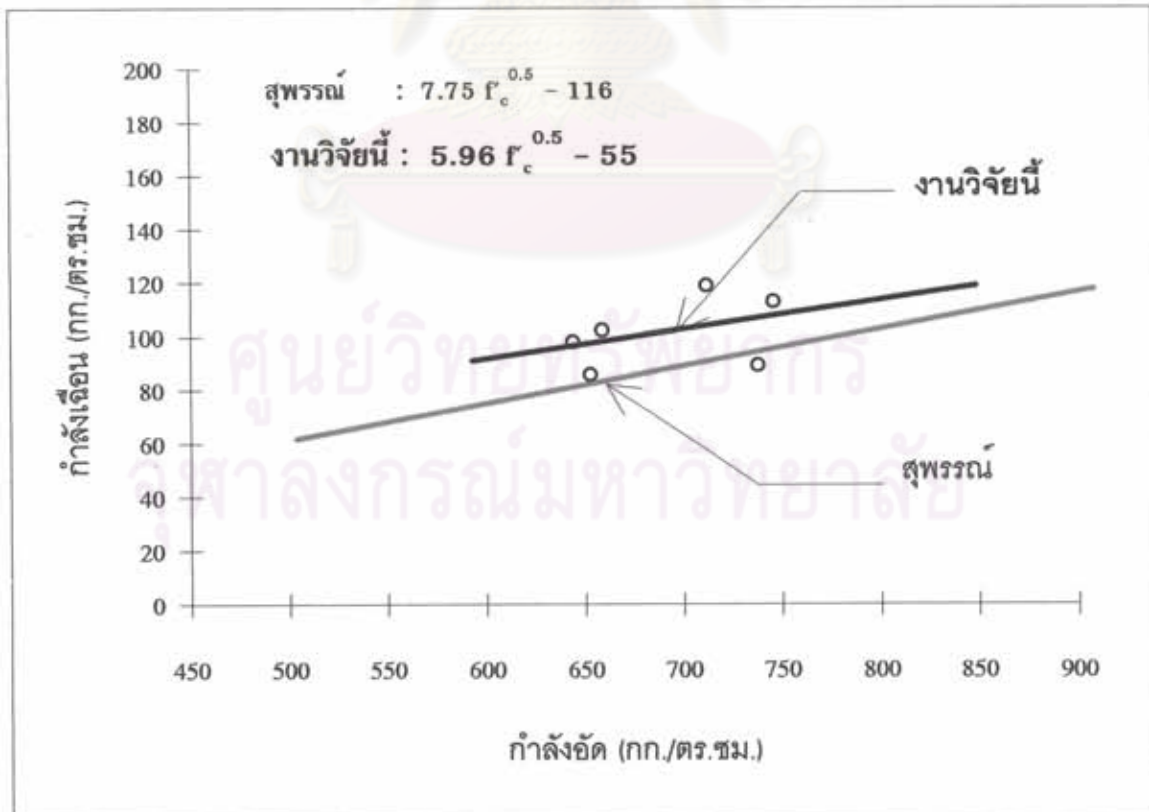
รูปที่ 4.5. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เทียบกับกำลังอัดที่ 28 วัน เมื่อการไหลตัวตามข้อกำหนด



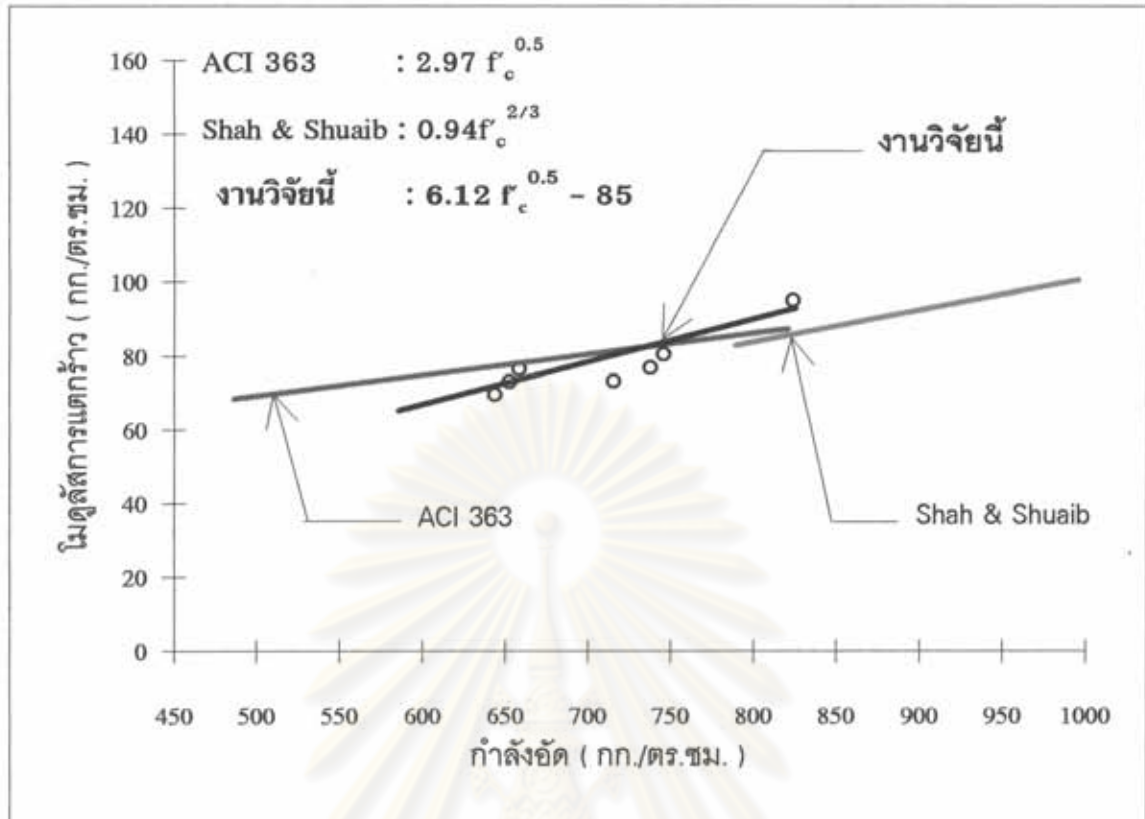
รูปที่ 4.6. ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบกับกำลังอัดที่ 28 วัน ที่การไหลตัวต่างกัน



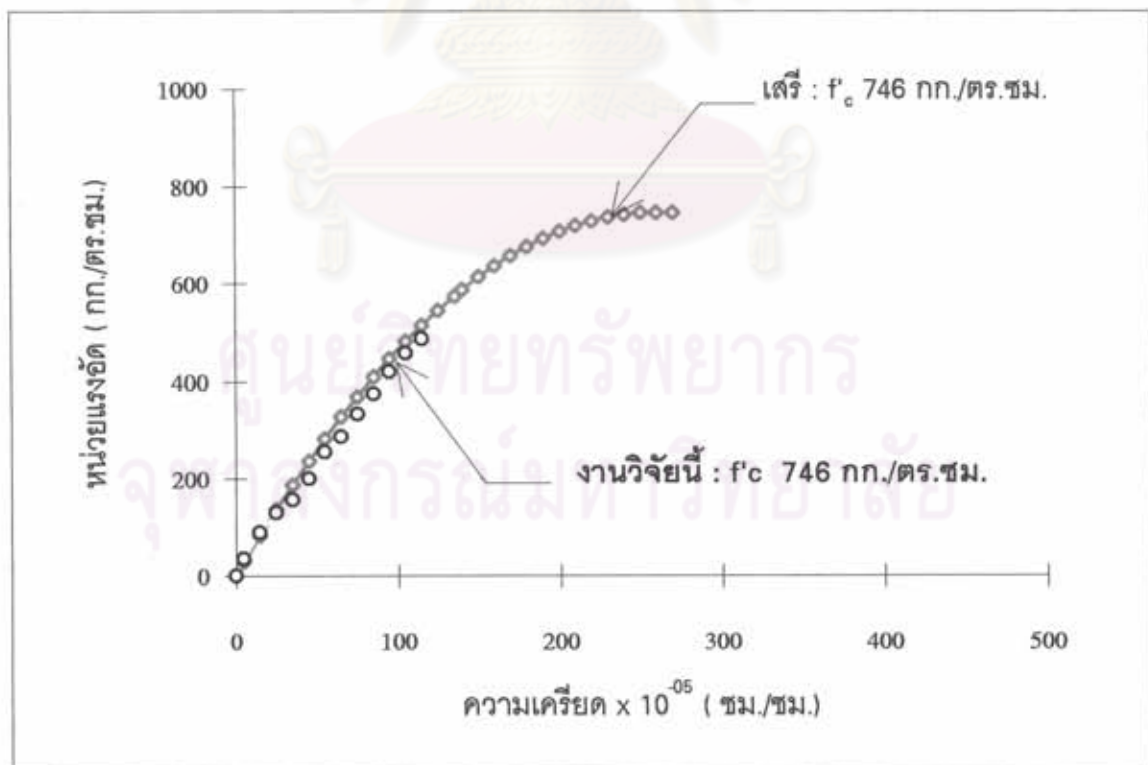
รูปที่ 4.7. กำลังดึงแตกแยกของคอนกรีตสมรรถนะสูง



รูปที่ 4.8. กำลังเฉือนของคอนกรีตสมรรถนะสูง

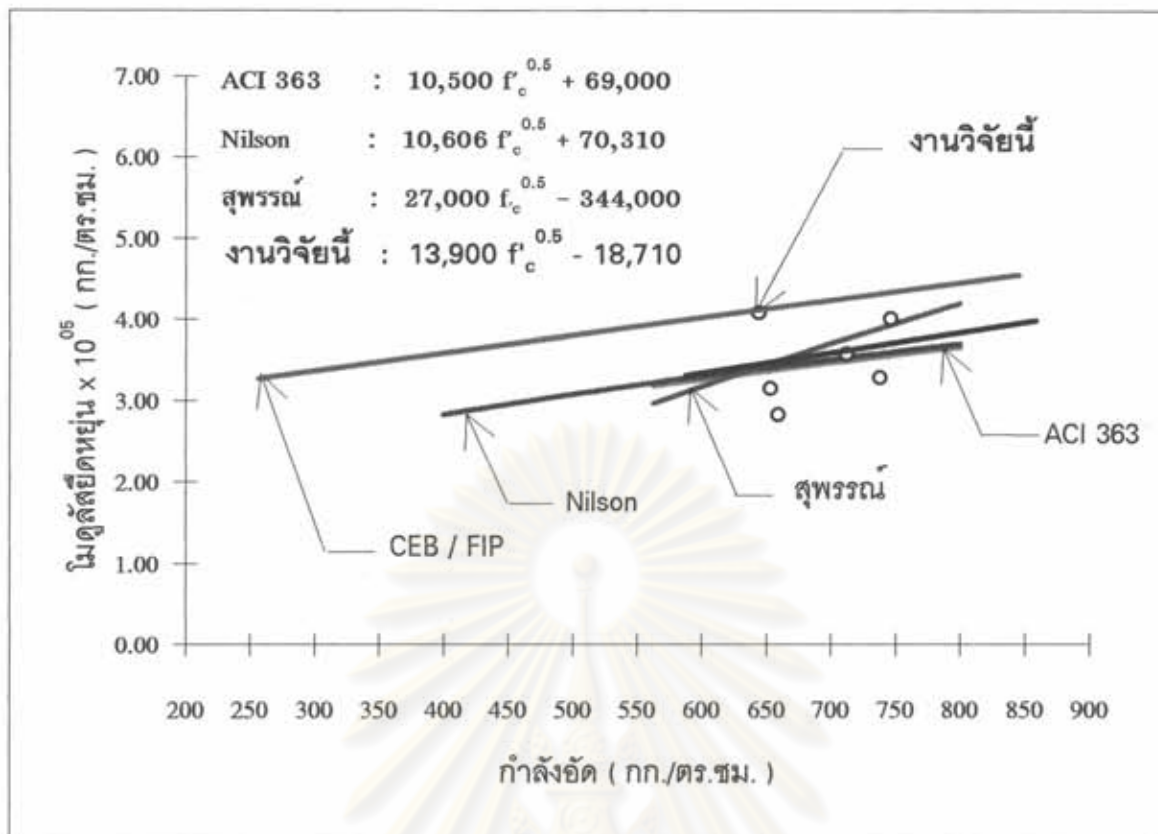


รูปที่ 4.9. กำลังตัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

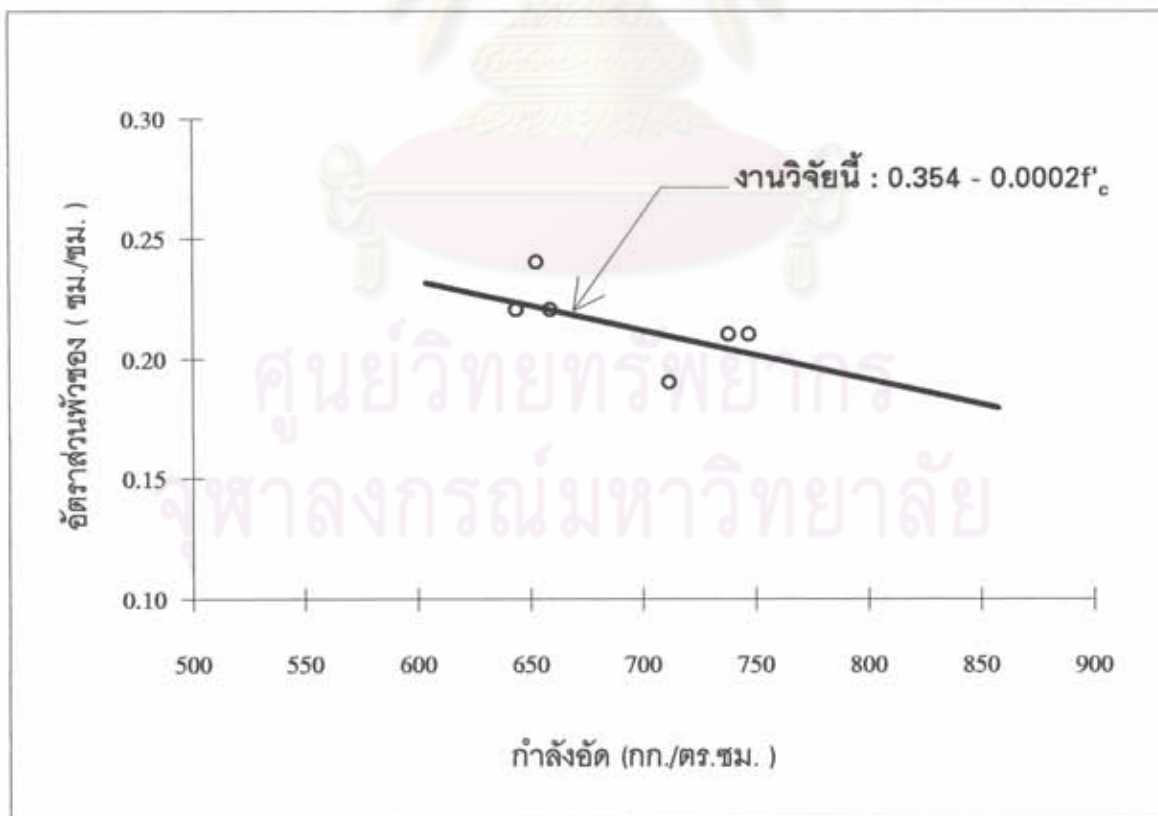


รูปที่ 4.10. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเคียดของคอนกรีตสมรรถนะสูง  
ที่ กำลังอัด 746 กก./ตร.ซม.

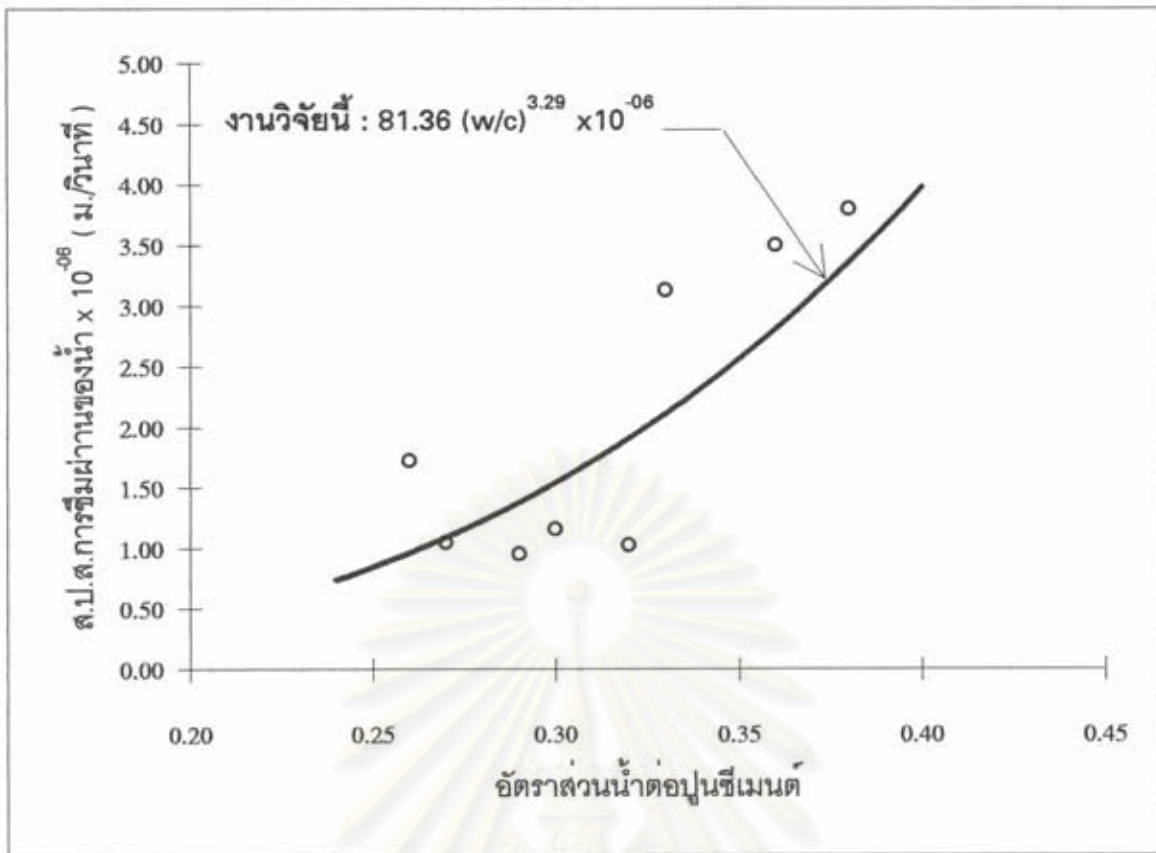




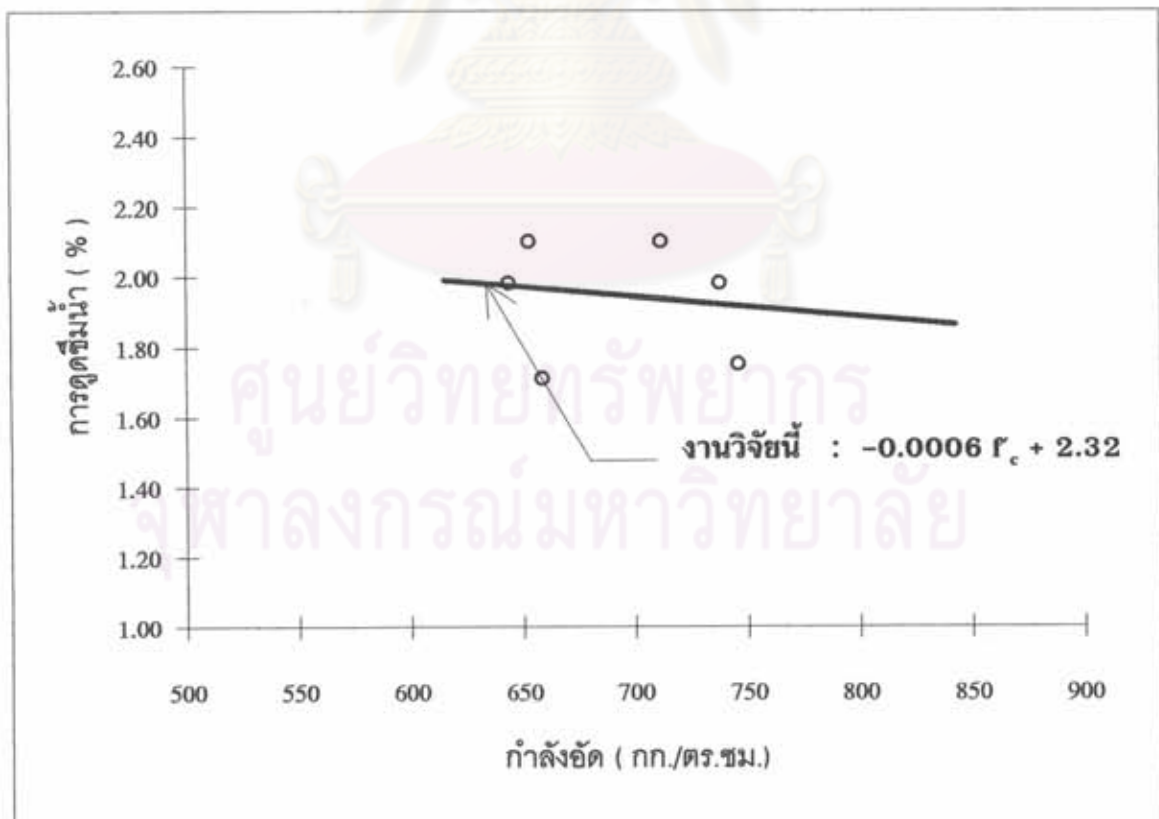
รูปที่ 4.11. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสมรรถนะสูง



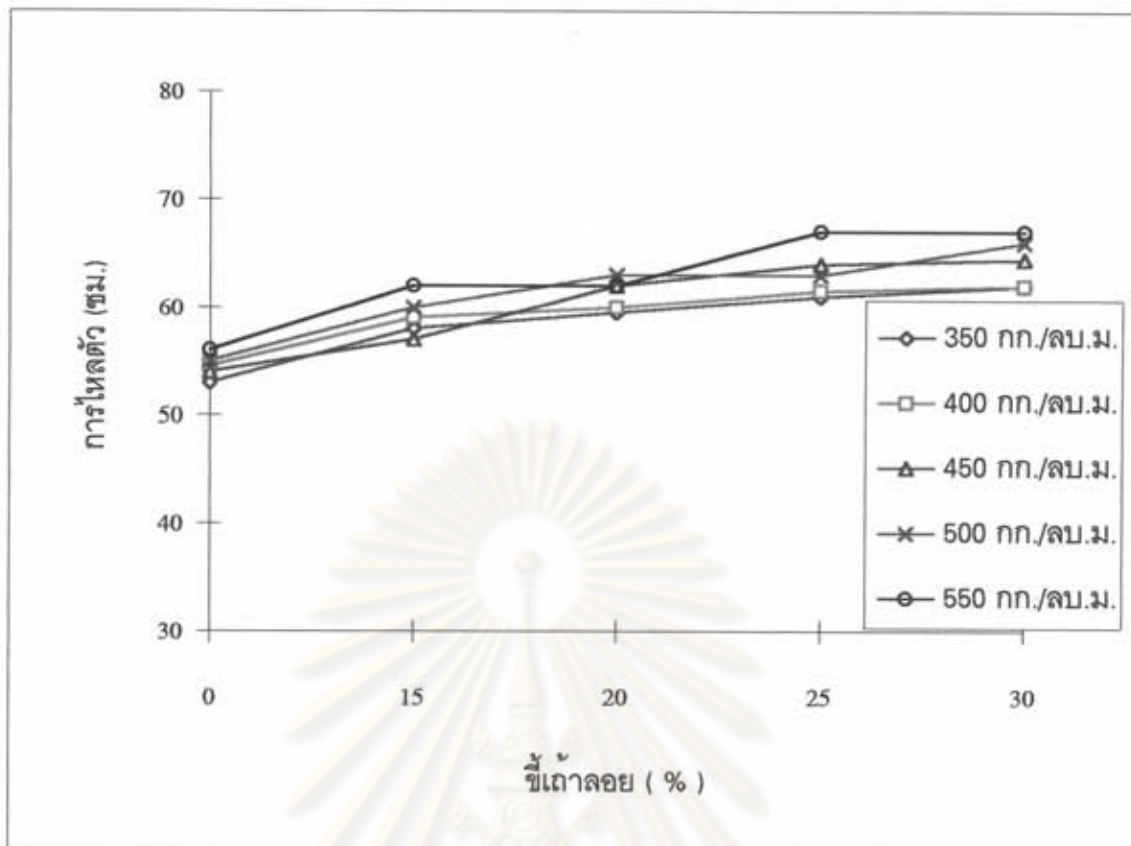
รูปที่ 4.12. อัตราส่วนพัชของของคอนกรีตสมรรถนะสูง



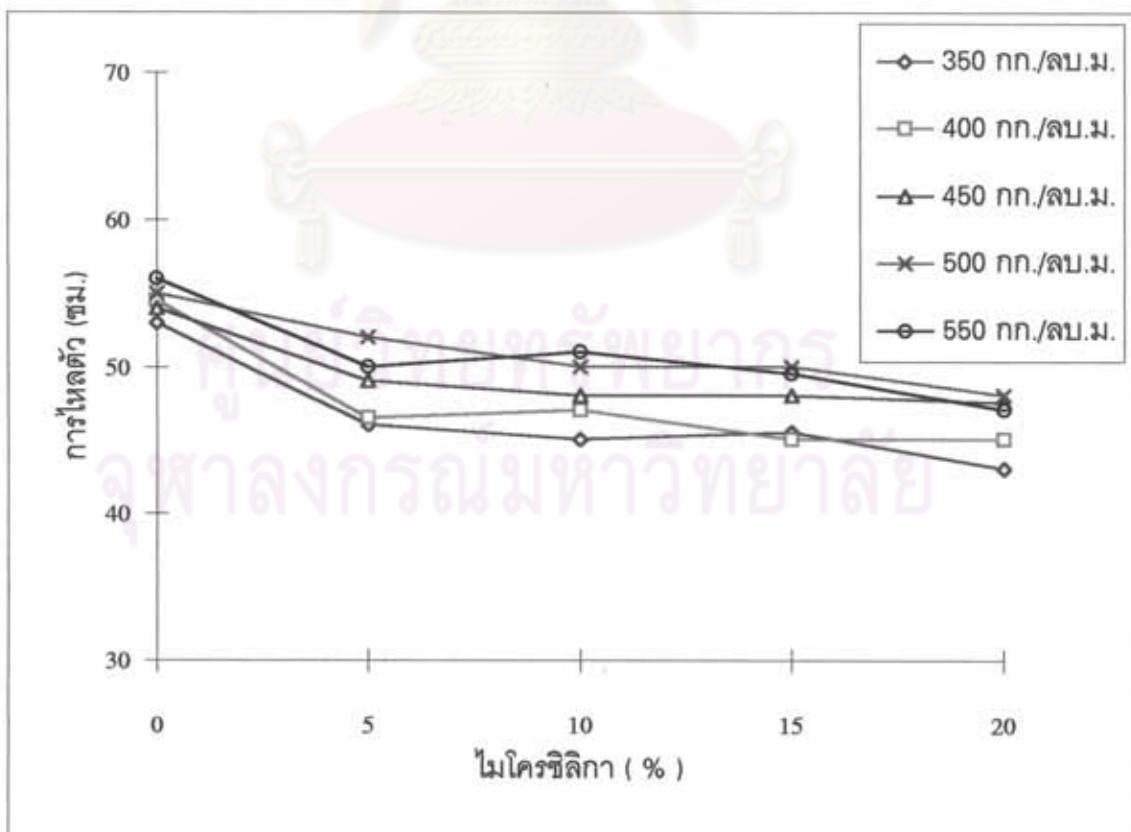
รูปที่ 4.13. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตสมรรถนะสูง



รูปที่ 4.14. การดูดซึมน้ำของคอนกรีตสมรรถนะสูง

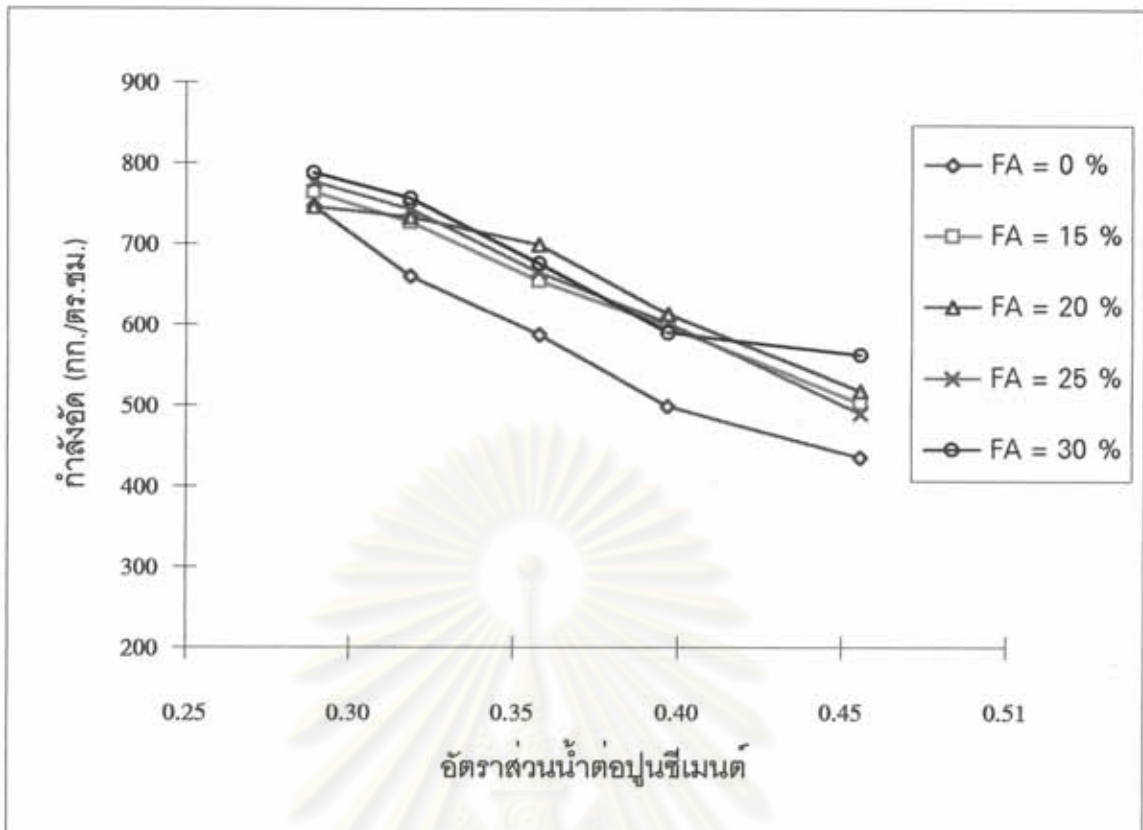


รูปที่ 4.15. การไหลตัวเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน ซีเถ้าลอย

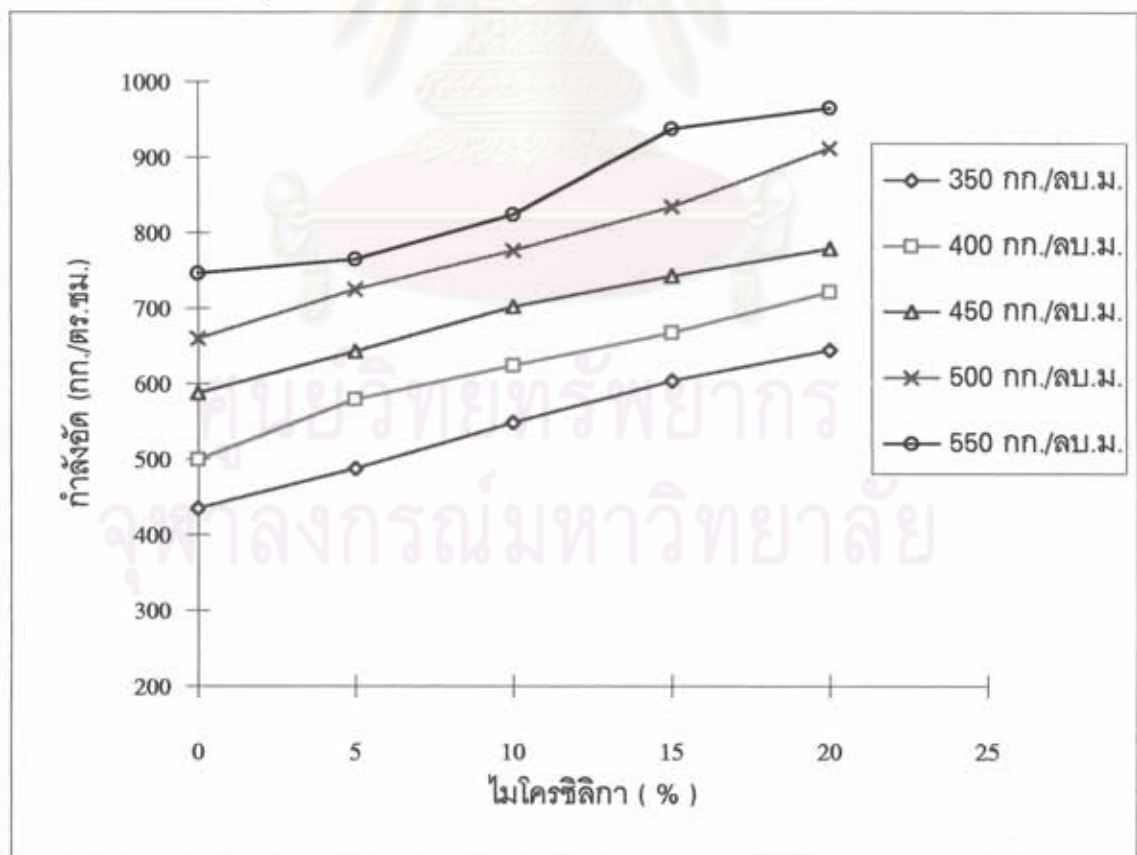


รูปที่ 4.16. การไหลตัวเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน ไมโครซิลิกา

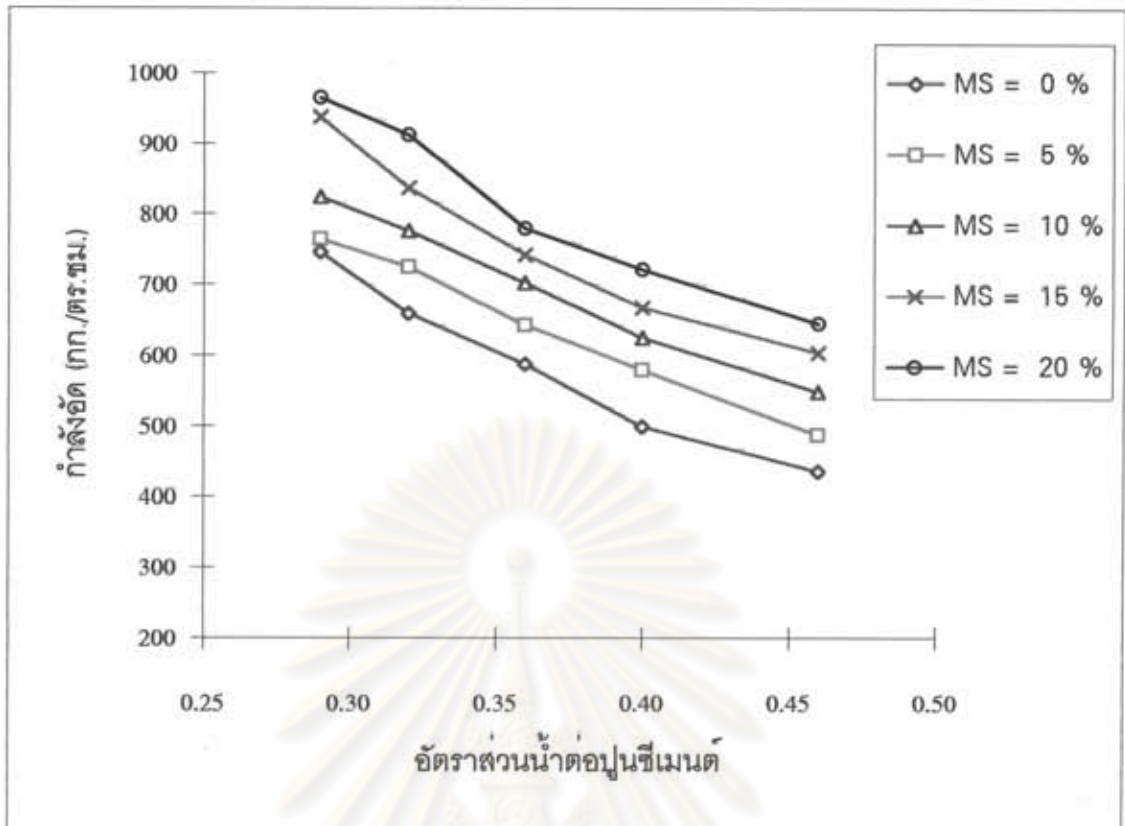




รูปที่ 4.17. กำลังอัดที่อายุ 28 วัน กับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่อัตราการเพิ่มซีเมนต์แตกต่างกัน

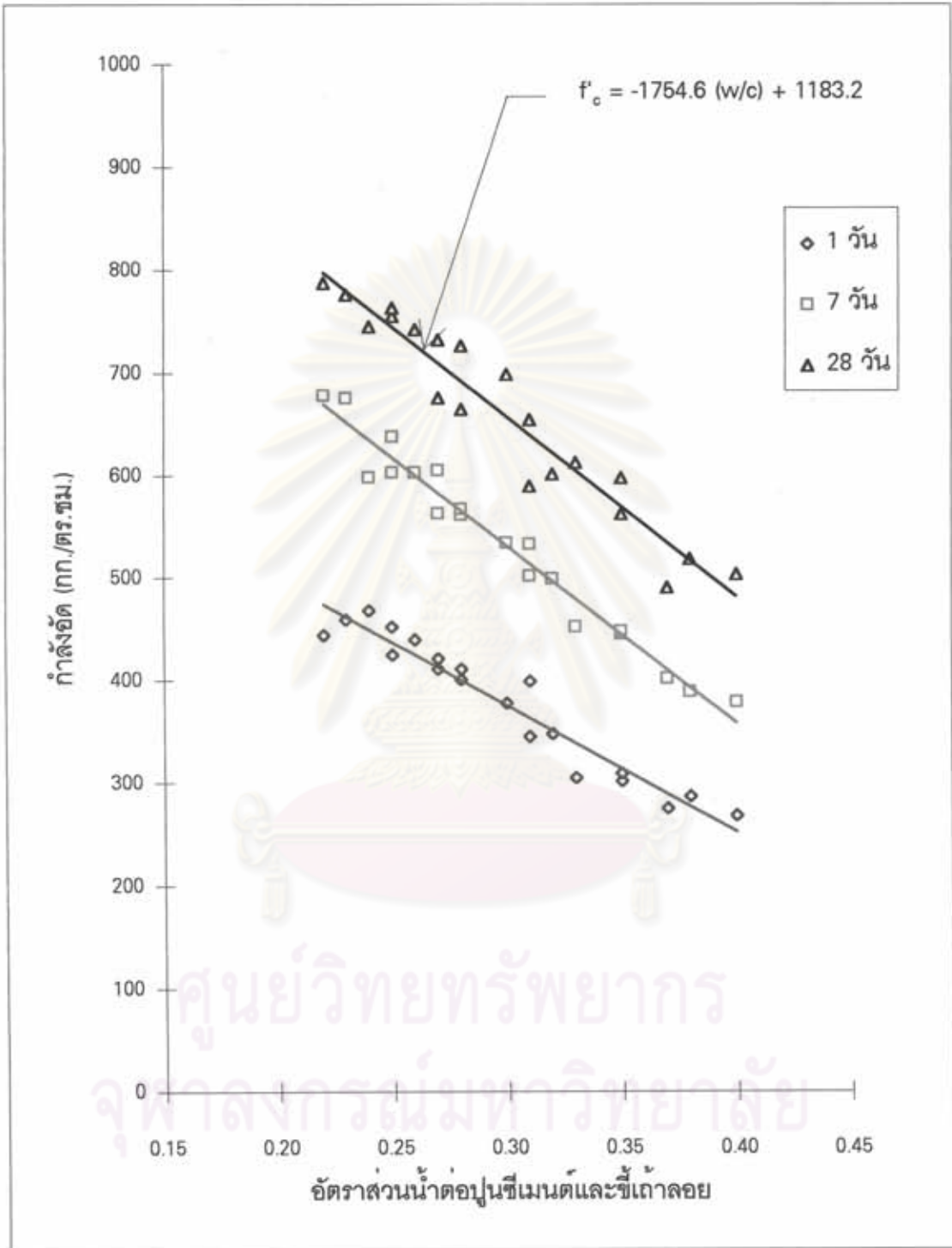


รูปที่ 4.18. กำลังอัดเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน ไมโครซิลิกา



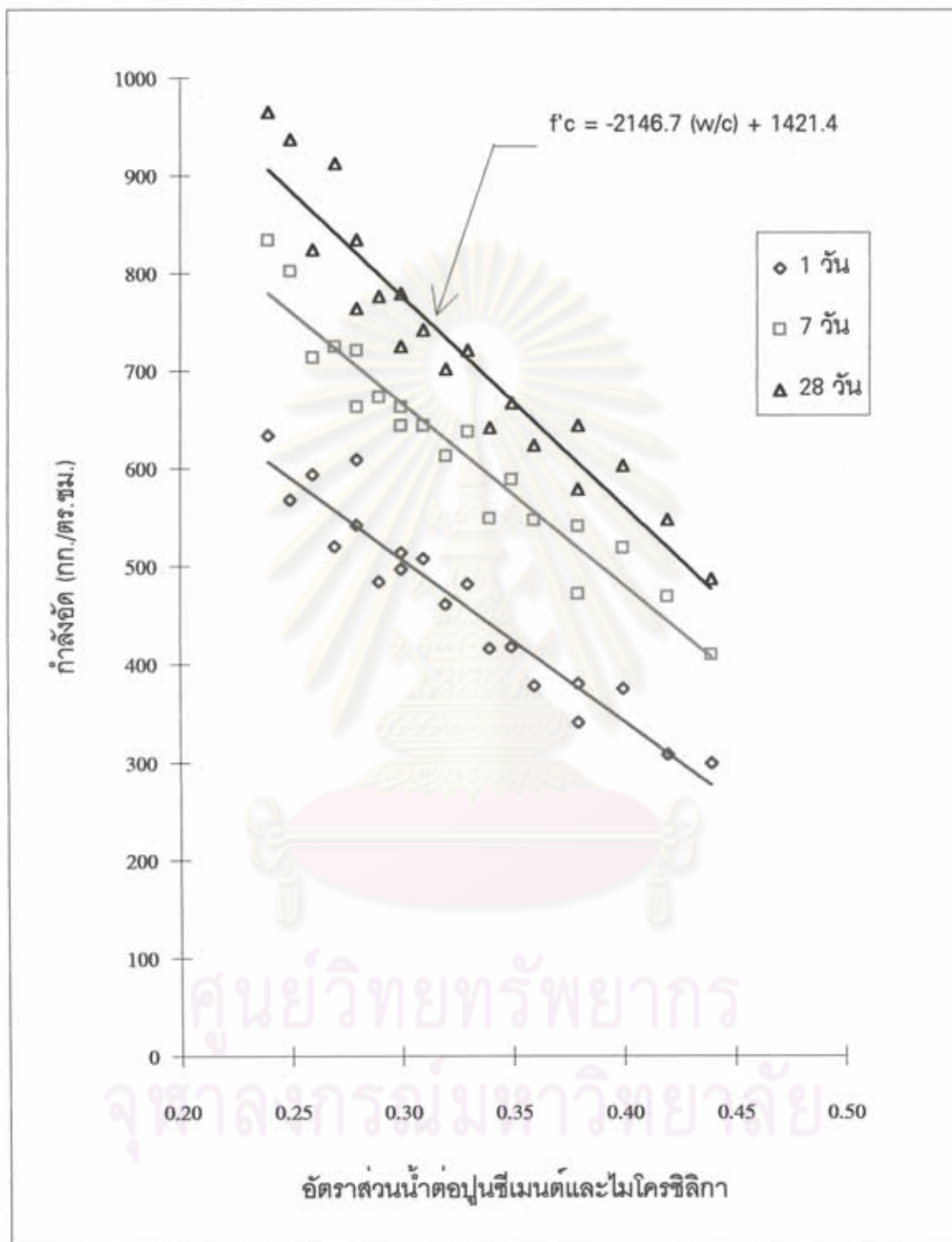
รูปที่ 4.19. กำลังอัดที่อายุ 28 วัน กับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่อัตราการเพิ่มไมโครซิลิกาต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

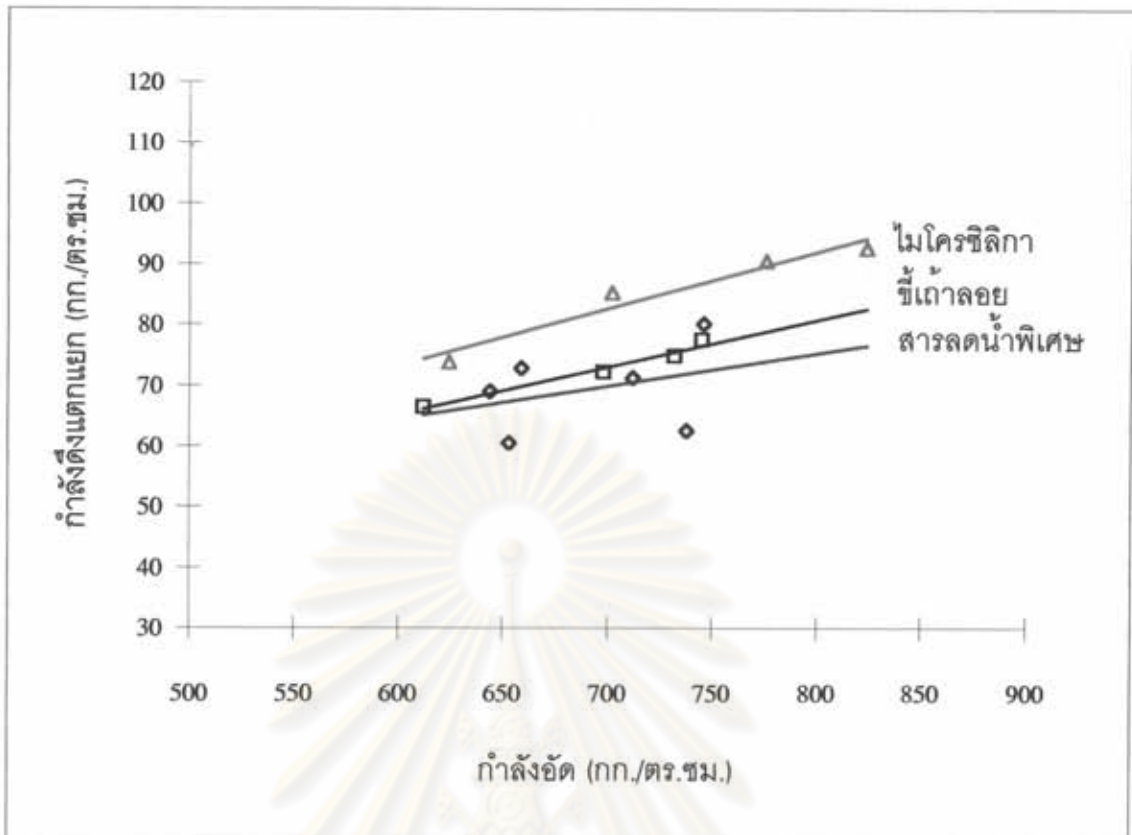


รูปที่ 4.20. กำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และซีเถ้าลอย

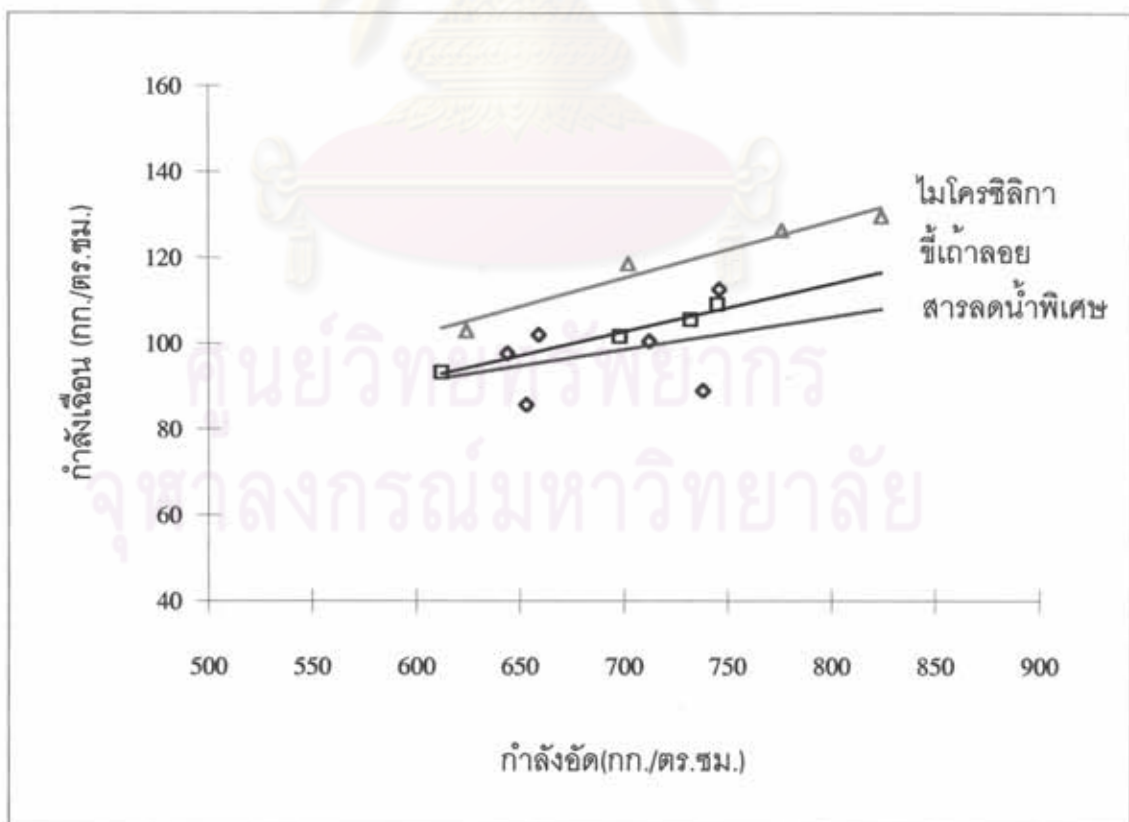




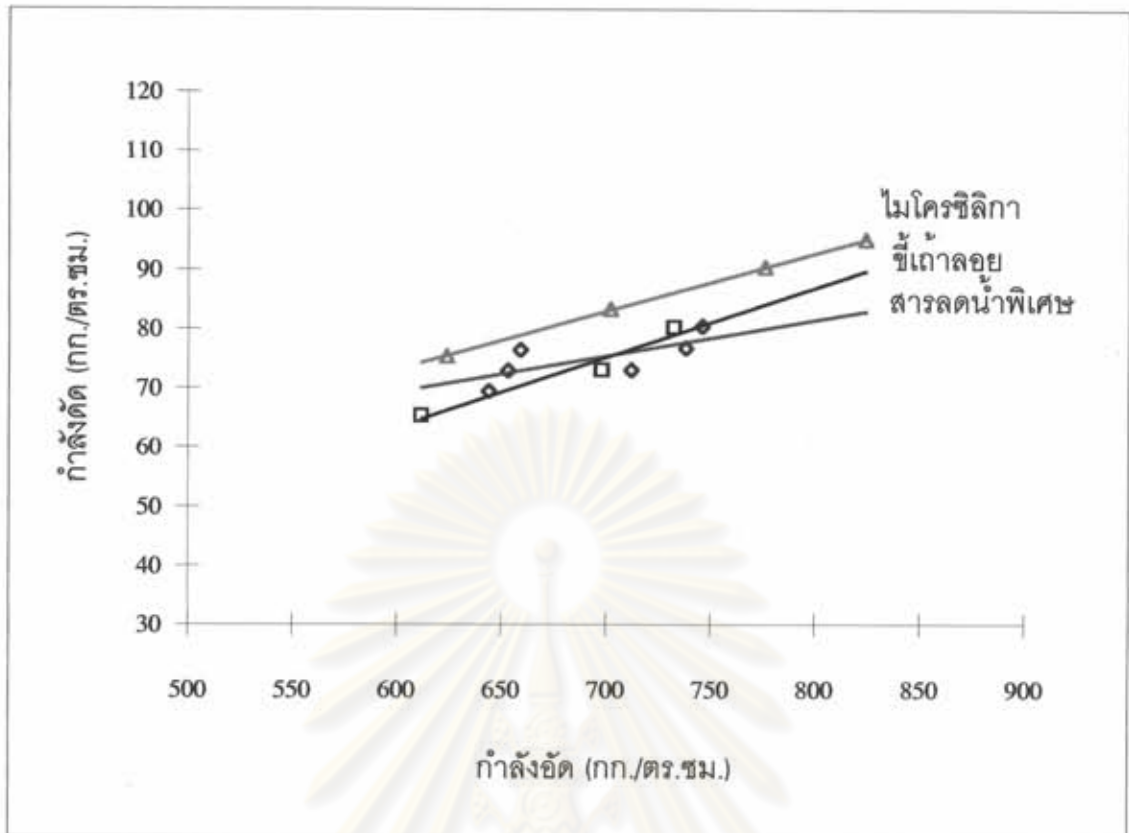
รูปที่ 4.21. กำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และไมโครซิลิกา



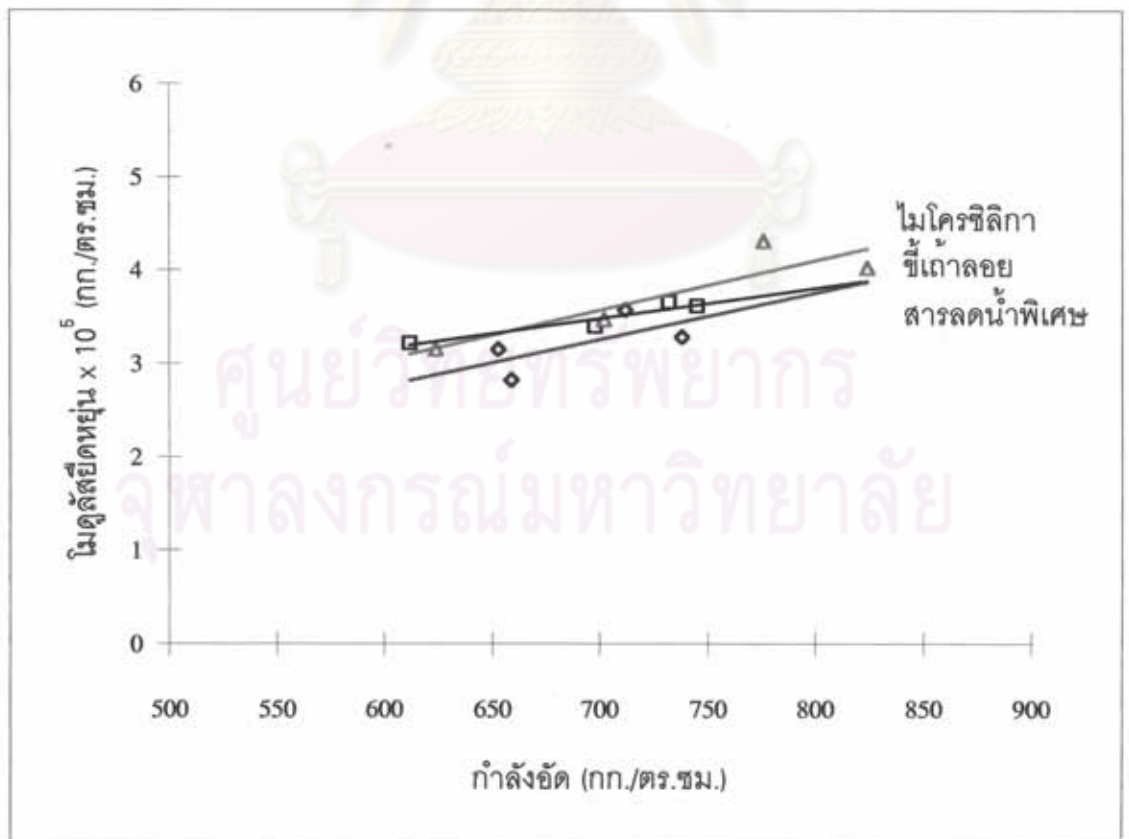
รูปที่ 4.22. กราฟเปรียบเทียบกำลังดึงแตกแยกของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน



รูปที่ 4.23. กราฟเปรียบเทียบกำลังเขื่อนของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน

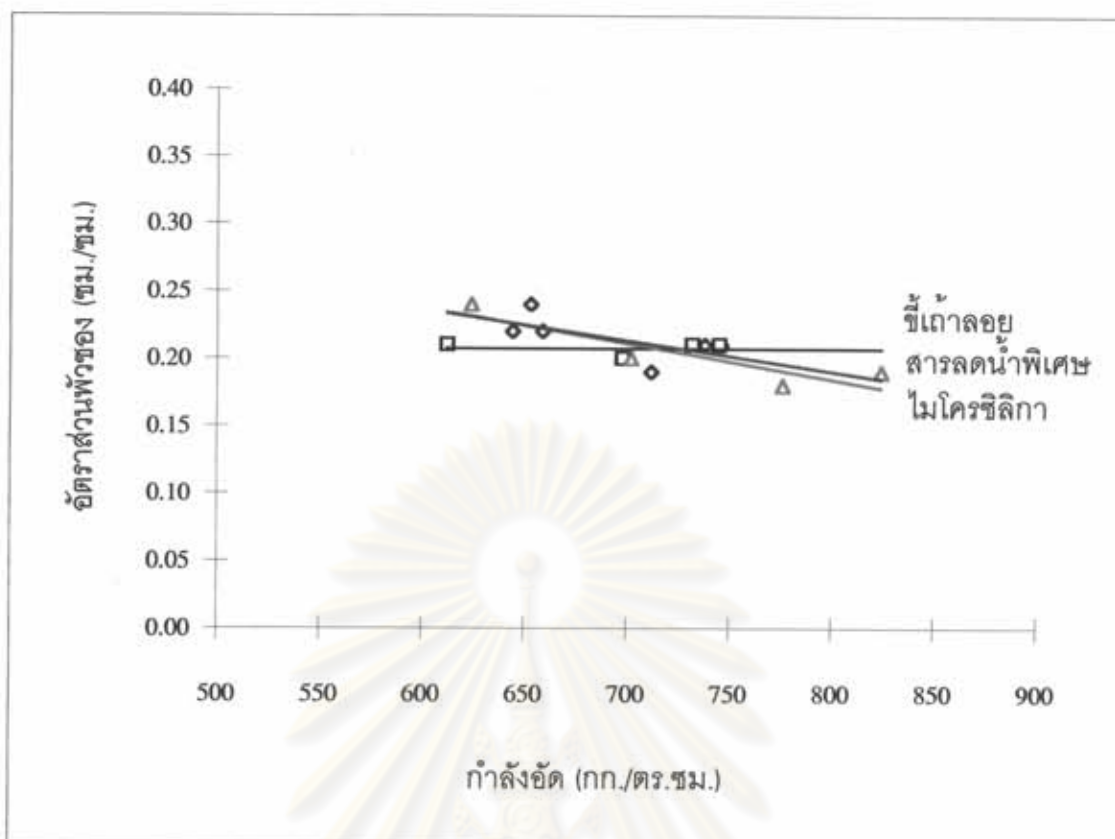


รูปที่ 4.24. กราฟเปรียบเทียบกำลังตัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน

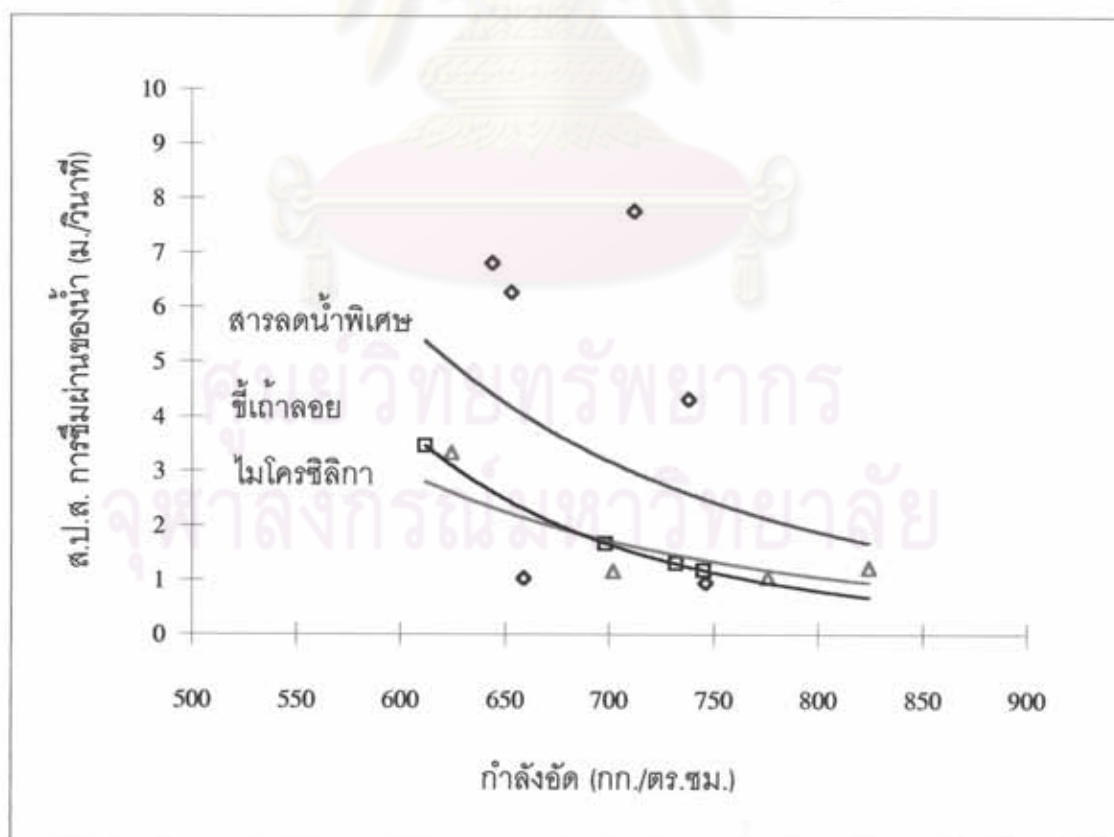


รูปที่ 4.25. กราฟเปรียบเทียบโมดูลัสของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน

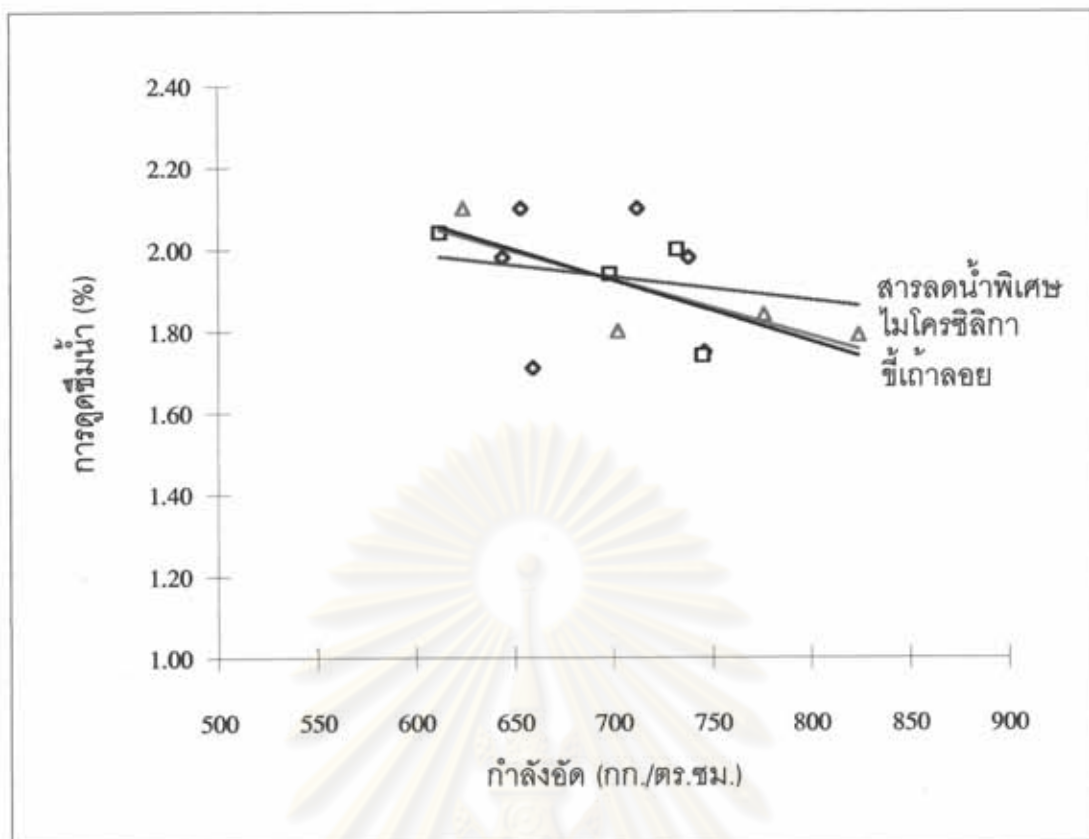




รูปที่ 4.26. กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนหัวของของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอชโซลาน

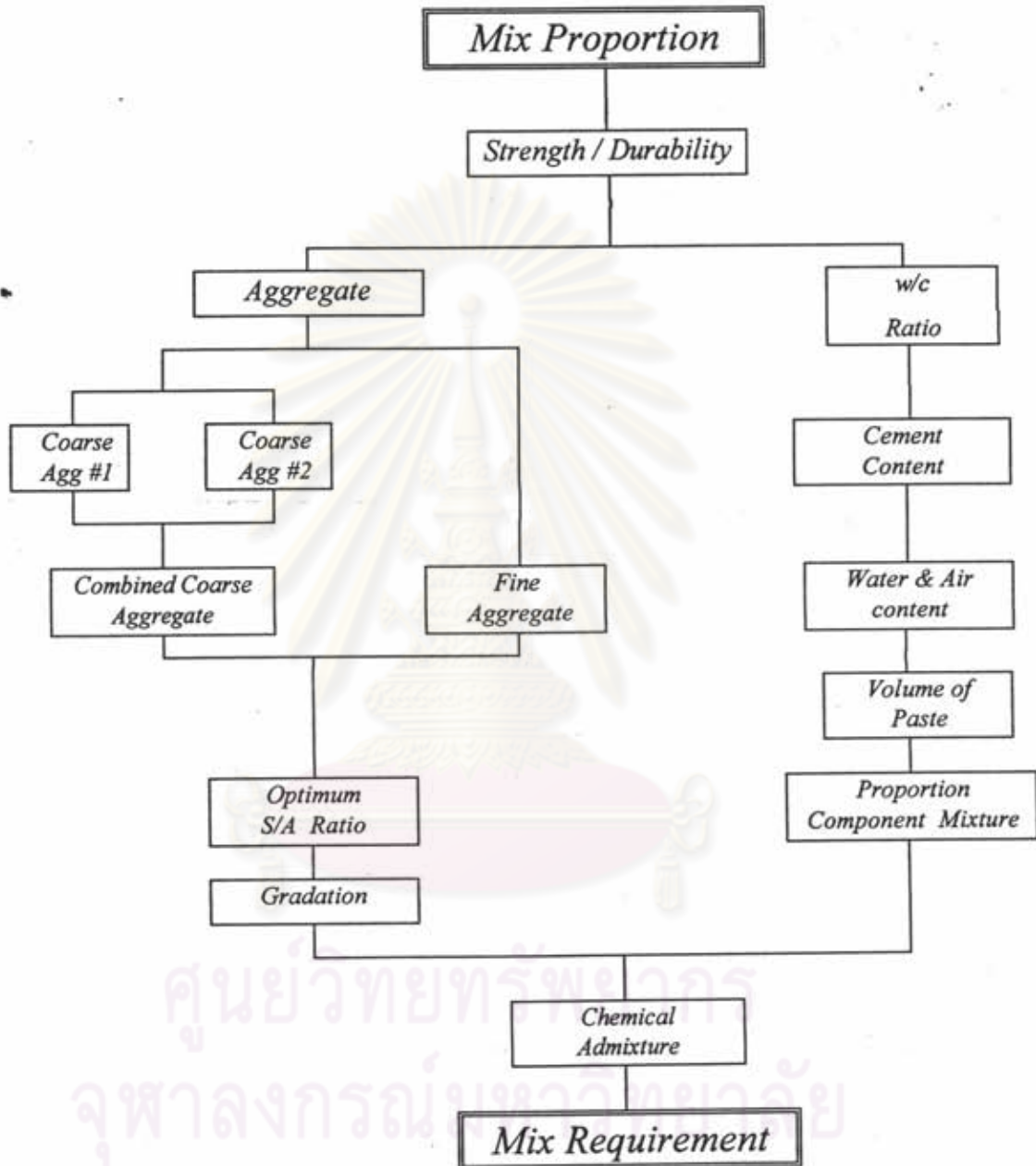


รูปที่ 4.27. กราฟเปรียบเทียบการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอชโซลาน



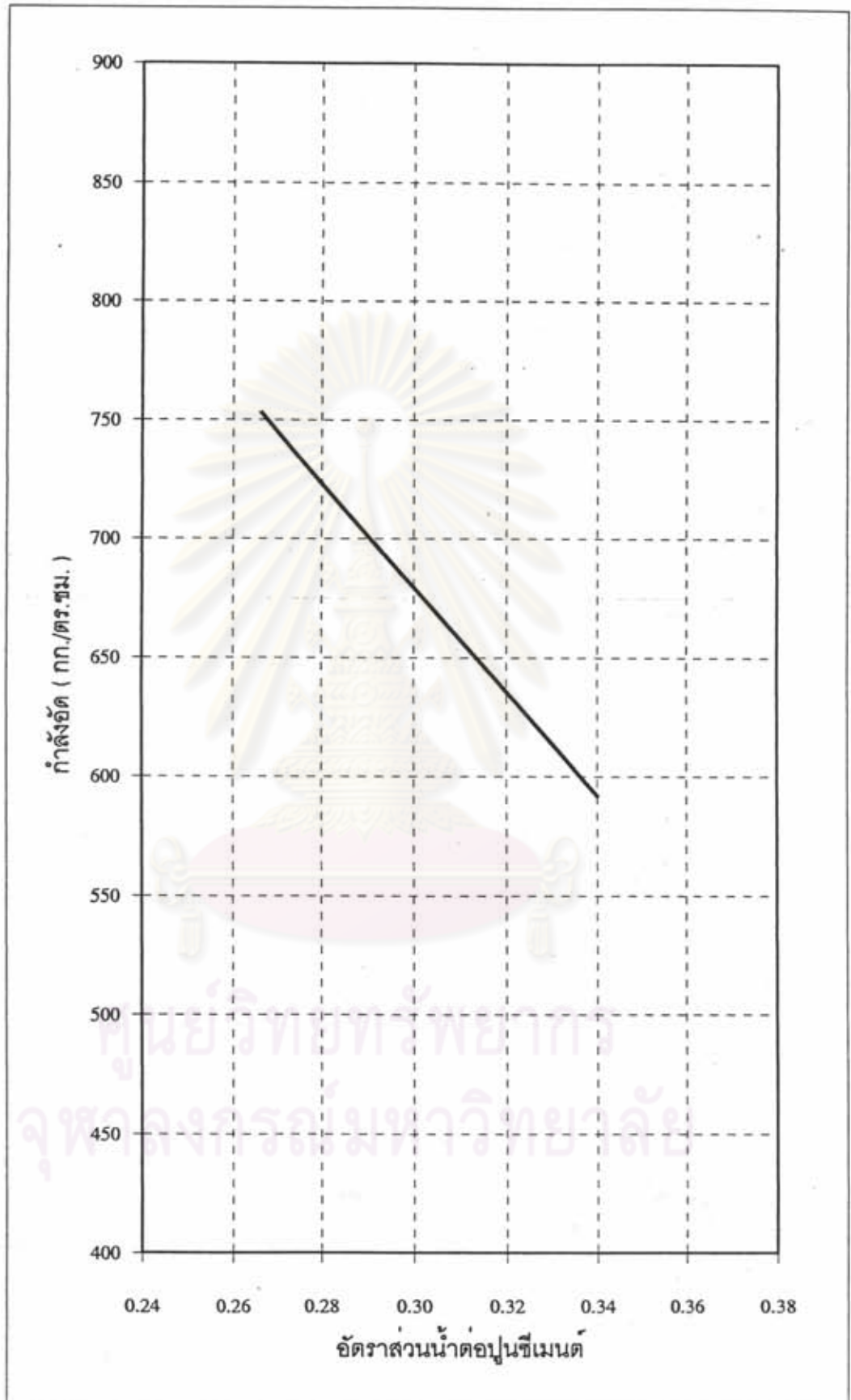
รูปที่ 4.28. กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของคอนกรีตสมรรถนะสูง  
เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

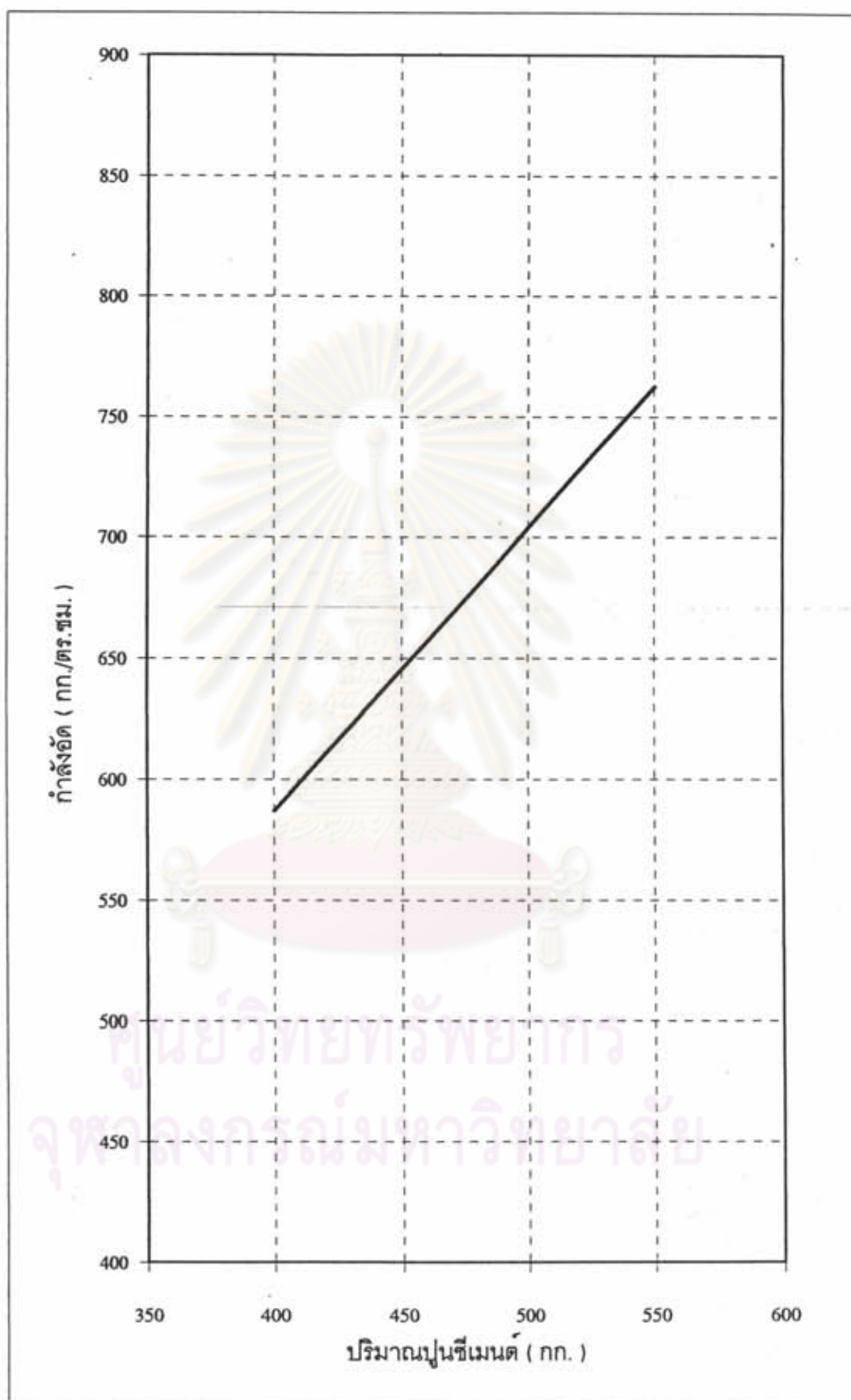


รูปที่ 4.29. Flow Chart การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง

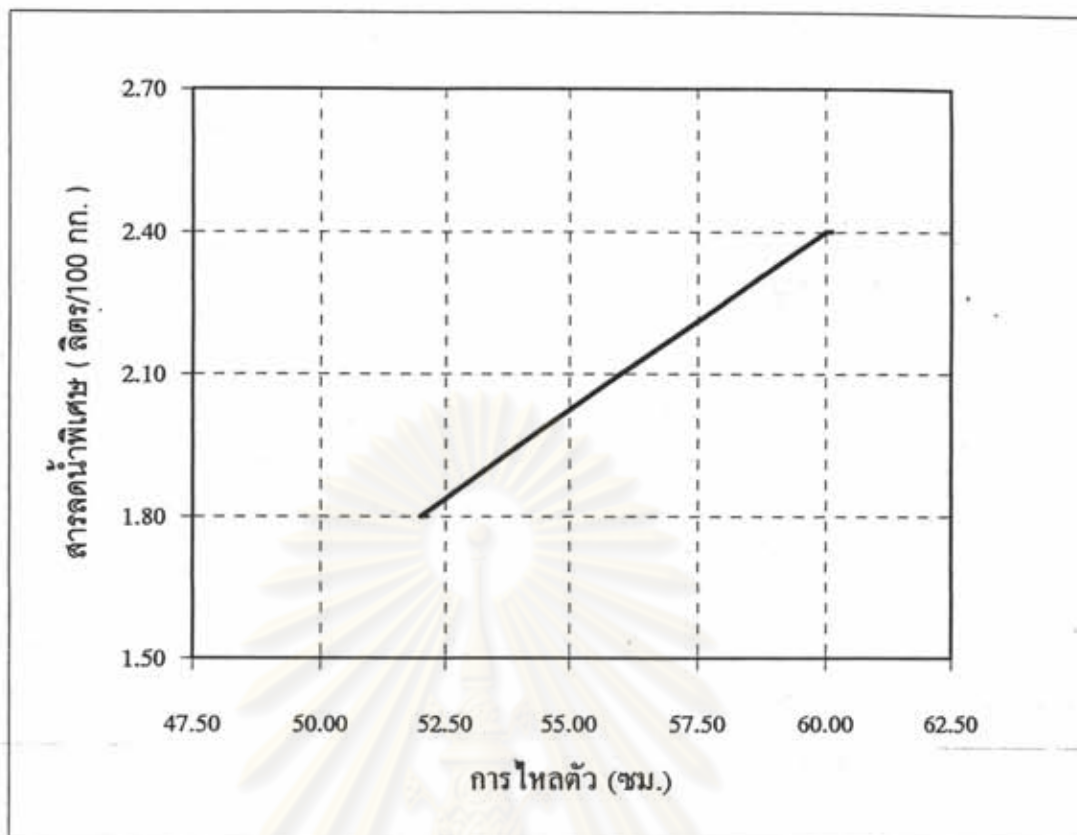




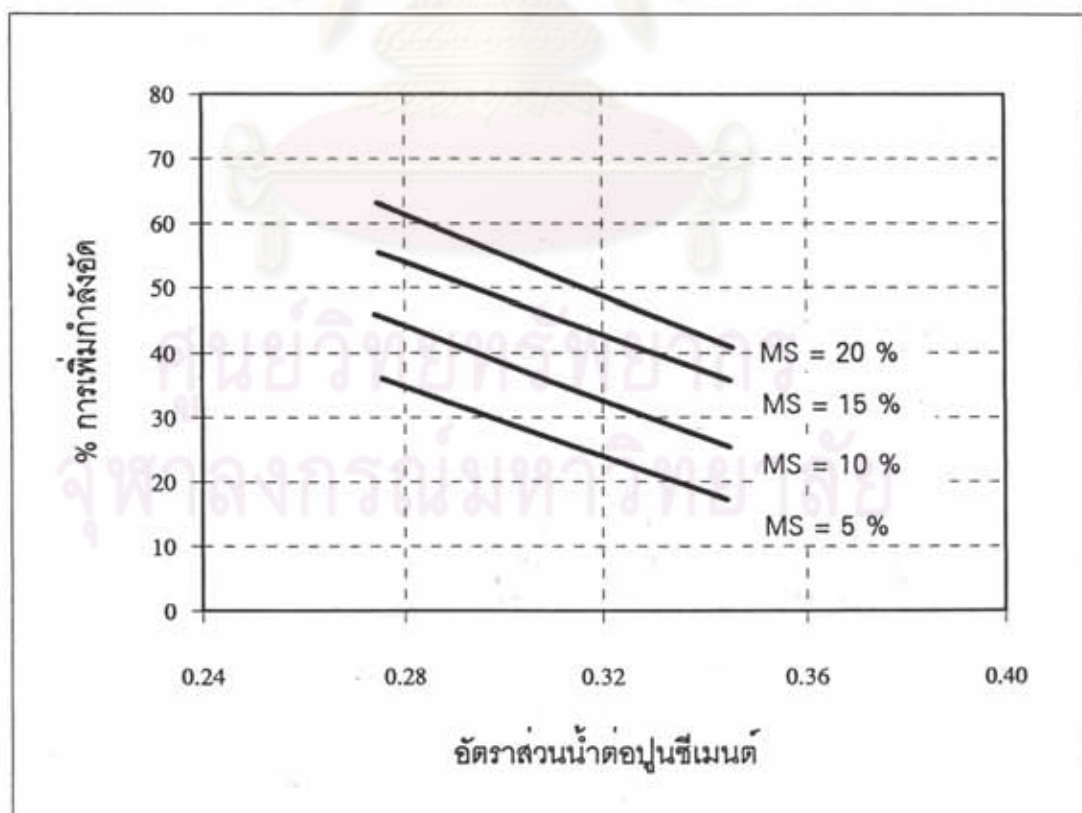
รูปที่ 4.30. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต



รูปที่ 4.31. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

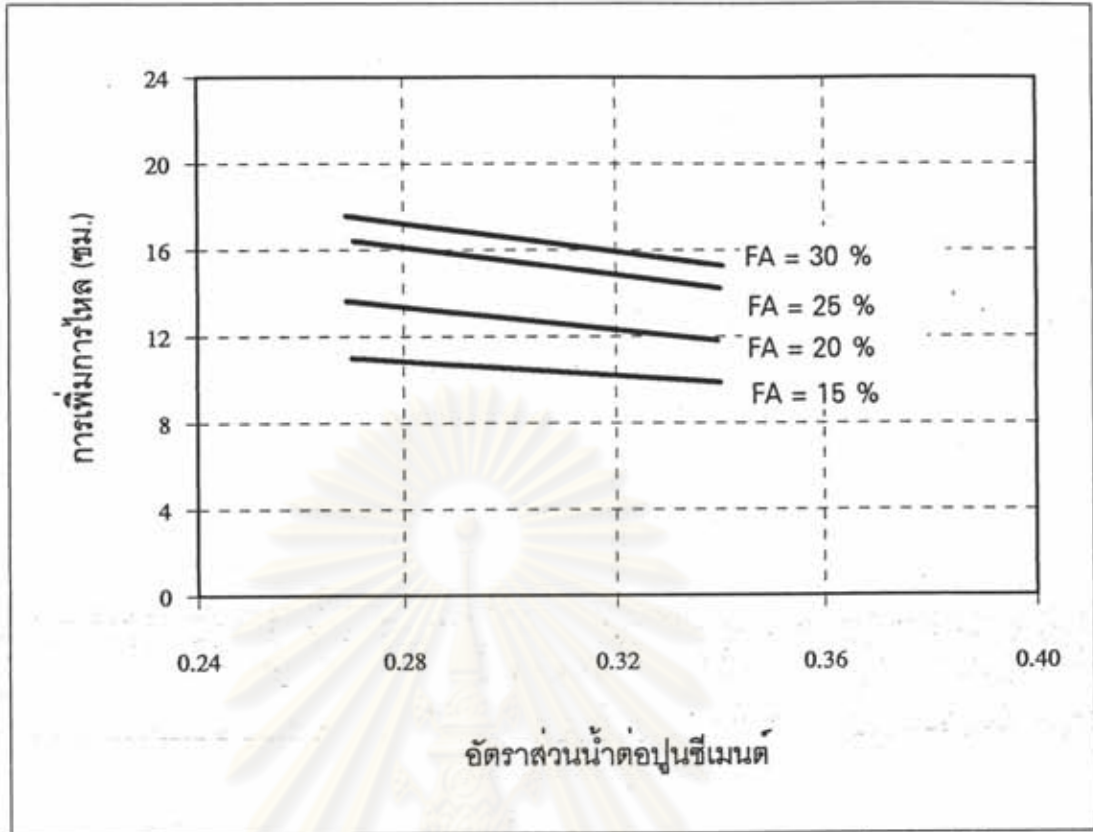


รูปที่ 4.32. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำพิเศษกับเปอร์เซ็นต์การไหลตัว



รูปที่ 4.33. กราฟแสดงอัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงด้วยสารไมโครซิลิกา





รูปที่ 4.34. กราฟแสดงอัตราการเพิ่มการหดตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูงด้วยสารซีเมนต์