บทที่ 3
การทดสอบและผลการทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูง

งานวิจัยคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ซีเมนต์บางส่วนที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเริ่มต้นจากงานวิจัยของกิตติกร [33] และณรงศักดิ์ [34] ที่ได้ออกแบบส่วนผสมไว้เพื่อรองรับคุณสมบัติหลักในสองสถานะภาพคือ ในสภาพคอนกรีตเหลวเพื่อประโยชน์ในการทำงานได้และในสภาพแข็งเกี่ยวกับกำลังอัดและความทนทาน การศึกษาวิจัยได้ทดสอบและหาคุณสมบัติไปแล้วบางส่วน สำหรับในการวิจัยนี้จะพิจารณาศึกษารายละเอียดลึกลงไปถึงผลกระทบของซิลิกาฟูมที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมโดยวิธีการวิเคราะห์น้ำหนักถ่วงในอุณหภูมิสูง (Thermogravimetry Analysis (TGA)) ซึ่งทำให้สามารถอธิบายผลของซิลิกาฟูมที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตได้กระจ่างชัดมากยิ่งขึ้น

3.1 การศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ในการศึกษานี้จะหาผลกระทบเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตเพื่อจะได้ทราบว่า ปริมาณซิลิกาฟูมที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งการศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมสามารถหาได้จากปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นตามอายุของปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำกับซีเมนต์ในซีเมนต์เพสต์และเมื่อผสมด้วยซิลิกาฟูมจะสามารถวิเคราะห์หาผลกระทบจากปฏิกิริยาได้ด้วยการตรวจวัดด้วยวิธีการวิเคราะห์น้ำหนักถ่วงในอุณหภูมิสูง การศึกษาได้แยกพิจารณาใน 2 ส่วนหลักคือ

1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากอัตราส่วนผสมของซิลิกาฟูมที่แตกต่างกัน
2. อัตราการพัฒนากำลังของคอนกรีตจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟูมจากสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เป็นตัวแปร

รายละเอียดในตารางที่ 3.1 แสดงกลุ่มการทดสอบ (Series) ออกเป็นผลกระทบต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลกระทบต่อกำลัง โดยแยกรายละเอียดการทดสอบคือ

- ในกลุ่มการทดสอบหาผลกระทบจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก จะใช้สัดส่วนน้ำต่อมวลละเอียด (ซีเมนต์+ซิลิกาฟูม) คงที่ที่ 0.32 และศึกษาผลกระทบทางเคมีจากปริมาณซิลิกาฟูมที่แปรผันตั้งแต่ 0 - 25 %

- สำหรับกลุ่มการทดสอบผลกระทบต่อกำลัง ได้พิจารณาสัดส่วนน้ำต่อมวลละเอียดใน 3 กลุ่มคือ 0.26 , 0.29 และ 0.32 ตามลำดับ แต่การทดสอบจะศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมซึ่งในแต่ละกลุ่มจากการแปรเปลี่ยนปริมาณจาก 0 - 25 %

3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต

ในเบื้องต้นได้ศึกษางานวิจัยของกิติกร [33] ที่ได้ออกแบบส่วนผสมเพื่อกำหนดคุณภาพคอนกรีตในสภาพเหลว และณรงศักดิ์ [34] ที่ได้ออกแบบส่วนผสมเพื่อให้ได้กำลังอัดสูงในสภาพแข็ง ซึ่งผลงานวิจัยของทั้ง 2 ราย จะได้ส่วนผสมสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีคุณภาพดีทั้งในสภาพเหลวและสภาพแข็งโดยที่ปราศจากซิลิกาฟูม ในงานวิจัยนี้จะหาผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อคอนกรีตสมรรถนะสูงจึงได้นำส่วนผสมคอนกรีตที่ได้จากงานวิจัยของกิติกรและณรงศักดิ์มาใส่ร่วมกับซิลิกาฟูม ทั้งนี้ได้ศึกษาซิลิกาฟูมในลักษณะการแทนที่ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้โดยมีส่วนผสมดังนี้คือ

- อัตราส่วนของทรายต่อมวลรวมขนาดสูงสุด 1/2 " เท่ากับ 0.45
- ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 500 กก. (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1)
- มวลรวมขนาดใหญ่สุด 1/2 " ปริมาณ 1025 กก. และทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.7 - 2.9 ปริมาณ 830 กก.
- สารลดปริมาณน้ำและหน่วงการก่อตัว (Superplasticizer Type G) ปริมาณ 1.8 ลิตรต่อซีเมนต์ 100 กก. และใช้อัตราส่วนน้ำต่อมวลละเอียด (w/(c+sf)) 0.26 - 0.32

ซึ่งในส่วนผสมนี้จะใช้ปริมาณสารลดปริมาณน้ำคงที่ทุก ๆ ส่วนผสม จากการศึกษาพบว่าส่วนผสมดังกล่าวเมื่อใส่ซิลิกาฟูมแทนที่ซีเมนต์จะทำให้ความสามารถทำงานได้ลดลง โดยเฉพาะส่วนผสมที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟูมในปริมาณสูง (20 - 25 %) ไม่สามารถเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบได้ จึงได้มีการปรับแก้ส่วนผสมโดยวิธีลองผสม (Trial Mix) เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีความไหลลื่นสูง ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยการเพิ่มปริมาณสารลดปริมาณน้ำเพื่อทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในสภาพเหลวตามข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูงคือ มีค่าการยุบตัวสูงสุด 20 ซม. และมีค่าการไหลแผ่เกินกว่า 50 ซม. ปริมาณสารลดปริมาณน้ำที่ทำให้ส่วนผสมคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม มีความไหลลื่นสูงตามข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูงแสดงในตารางที่ 3.2

จากการศึกษาส่วนผสมสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใส่ซิลิกาฟูมข้างต้น สามารถแบ่งกลุ่มการศึกษาออกเป็น 2 ชุด คือ

ชุดที่ 1 สารลดปริมาณน้ำที่ใช้ในทุกส่วนผสมคอนกรีตมีค่าคงที่คือ 1.8 ลิตรต่อน้ำหนักซีเมนต์และซิลิกาฟูม 100 กก. ในแต่ละส่วนผสมซึ่งได้จากการศึกษาของกิติกร

ชุดที่ 2 แปรผันปริมาณของสารลดปริมาณน้ำในแต่ละส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อรักษาค่าความสามารถเทได้ให้เหมาะสมคือมีค่าความยุบตัวประมาณ 20 ซม. และมีค่าการไหลประมาณ 50 ซม ซึ่งได้จากการปรับแก้ส่วนผสมแล้ว

จากการศึกษาในชุดที่ 1 และ 2 ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งในสภาพเหลวและแข็ง ซึ่งผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

3.3 การหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์

การทดสอบหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์น้ำหนักถ่วงที่อุณหภูมิสูง จะใช้ความร้อนเผาตัวอย่างที่ศึกษาและจะบันทึกน้ำหนักที่หายไปในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป จากนั้นจะนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาสารประกอบของตัวอย่างที่เผาเพื่อหาสารประกอบและปริมาณจากน้ำหนักที่หายไปในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์ ซิลิกาฟูมและน้ำจะให้ผลผลิตที่สำคัญคือ คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและคัลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ด้วยคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ยุ่งยากดังนั้นการทดสอบหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีโครงสร้างที่แน่นอนกว่าและสามารถหาน้ำหนักโมเลกุลได้ง่ายกว่าจะสามารถคำนวณเทียบสัดส่วนกลับเพื่อให้ทราบถึงปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้ ตัวอย่างทดสอบมีขนาด 5×5×5 ซม. ของซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมโดยเครื่องมือวิเคราะห์น้ำหนักถ่วงในอุณหภูมิสูง

วิธีการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบทำได้ดังนี้คือ หล่อซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมโดยใช้ปริมาณซีเมนต์ 1500 กรัม ส่วนซิลิกาฟูมใช้ตามสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การแทนที่ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ผสมกับน้ำเพื่อให้เพสต์มีความข้นเหลวตามปกติโดยใส่น้ำยาลดปริมาณน้ำร่วมด้วย โดยหล่อทิ้งไว้ในอากาศชื้นเป็นเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาบ่มในน้ำสะอาดและนำตัวอย่างมาทดสอบตามอายุ 1, 3, 7, 28, 56 วัน ส่วนตัวอย่างที่ 1 วันก็นำมาทดสอบเลยไม่ต้องบ่ม นำตัวอย่างมาบดให้เป็นผงแล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ด้วยการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1.5 ชม. แล้วเก็บไว้ในภาชนะที่มีสารดูดความชื้น แล้วจึงนำไปใส่ใน Crucible ประมาณ 200 มิลลิกรัม ด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดถึงมิลลิกรัมและใส่ในเครื่องมือ TGA ทดสอบในบรรยากาศของไนโตรเจนจะต้องดูดอากาศออกจนเป็นสูญญากาศแล้วปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในอัตรา 383 มิลลิลิตรต่อนาที ทำเช่นนี้ 2 ครั้ง แล้วจึงเริ่มเผาตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 650 °C โดยให้ความร้อนกับตัวอย่างในอัตรา 10 °C ต่อนาที เครื่องมือทดสอบ TGA ได้แสดงในรูปที่ 3.1 - 3.2

ผลการทดสอบแสดงในตาราง 3.5 ในการทดสอบหาปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.32 ที่อายุ 1 , 3 , 7 , 28 และ 56 วัน โดยปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของซีเมนต์และซิลิกาฟูม ปรากฏว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ใส่ซิลิกาฟูมจะมีปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นตามอายุ แต่สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ใส่ซิลิกาฟูมนั้นไม่ว่าจะใส่ในปริมาณเท่าใดก็ตามจะมีปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นที่อายุ 1 , 3 วัน แต่หลังจากอายุ 7 , 28 , 56 วัน จะมีปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเทียบกับที่อายุ 7 วัน ซึ่งที่ปริมาณซิลิกาฟูม 0 % มีค่าอยู่ระหว่าง 10.07 - 15.73 % , ที่ปริมาณซิลิกาฟูม 5 % มีค่าอยู่ระหว่าง 9.4 - 12.51 % , ที่ปริมาณซิลิกาฟูม 10 % มีค่าอยู่ระหว่าง 8.58 - 10.79 % , ที่ปริมาณซิลิกาฟูม 15 % มีค่าอยู่ระหว่าง 7.07 - 8.68 % , ที่ปริมาณซิลิกาฟูม 20 % มีค่าอยู่ระหว่าง 6.84 - 8.15 % และที่ปริมาณซิลิกาฟูม 25 % มีค่าอยู่ระหว่าง 6.08 - 7.64 %

3.4 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

เป็นการทดสอบหาค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39 (Test Method For Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens) โดยจะทดสอบหากำลังอัดเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน การจัดเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 192 (Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory) และบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำให้เป็นตามมาตรฐาน ASTM C 192 ยกเว้นที่อายุ 1 วัน ให้นำไปเคลือบหัวด้วยกำมะถันได้เลย เมื่อครบอายุทดสอบ ให้นำตัวอย่างคอนกรีตขึ้นจากน้ำ 1 วันก่อนทดสอบ นำมาผึ่งให้แห้ง และชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างและวัดขนาดเพื่อนำไปหาความหนาแน่นของคอนกรีต แล้วนำไปหล่อกำมะถัน คุมหัวลูกปูนตามมาตราฐาน ASTM C 617 (Standard Practice for Capping Cylindrical-Concrete Specimens) เนื่องจากตัวอย่างทดสอบเป็นคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงดังนั้นจึงต้องผสมกราไฟต์ในกำมะถันเพื่อป้องกันไม่ให้หัวคลุมแตกเสียหายระหว่างการทดสอบ จากนั้นจึงนำตัวอย่างเข้าทดสอบในเครื่องทดสอบและทำการบันทึกค่าการทดสอบไว้เพื่อเป็นข้อมูลประกอบ และรายงานผลเป็นหน่วยแรงอัด (Stress) ของคอนกรีต

ผลการทดสอบในชุดที่ 1 ได้ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ปรากฏว่าคอนกรีตมีกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 1 วันเกินกว่า 300 กก.ต่อตร.ซม.และที่อายุ 28 วันเฉลี่ยเกินกว่า 600 กก.ต่อตร.ซม. ถือว่าผ่านเกณฑ์ของคอนกรีตสมรรถนะสูง ที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.32 ที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 15 % จะให้กำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดถึง 897 กก.ต่อตร.ซม.และคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 5 % จะมีกำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด 740 กก.ต่อตร.ซม. ค่ากำลังอัดจากผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 3.6 - 3.11

ส่วนผลการทดสอบในชุดที่ 2 ปรากฏว่าคอนกรีตที่อายุ 1 วัน ส่วนใหญ่จะยังไม่แข็งตัวจากผลกระทบของสารลดปริมาณน้ำมากเกินไปเพื่อรักษาความสามารถเทได้ สำหรับกำลังอัดที่อายุอื่น ๆ พบว่าค่ากำลังอัดไม่แตกต่างจากผลการทดสอบในชุดที่ 1 มากนัก ซึ่งที่อายุ 28 วันจะมีกำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 600 กก.ต่อตร.ซม. โดยที่สัดส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.26 ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม 15 % จะให้กำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดถึง 1008 กก.ต่อตร.ซม. ดังผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.12 - 3.17

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อกำลังอัด

SERIES	VARIABLES	
	% SILICA FUME	W/(C+SF)
POZZOLANIC ACTION	0 - 25 %	0.32
MECHANICAL ACTION	0 - 25 %	0.26
	0 - 25 %	0.29
	0 - 25 %	0.32

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารลดปริมาณน้ำที่ปรับแก้เพื่อความไหลลื่น (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์)

% SILICA FUME	W/(C+SF)		
	0.26	0.29	0.32
5	2.2	2.0	1.8
10	3.0	2.2	2.0
15	3.6	2.4	2.1
20	4.6	2.6	2.4
25	*	3.2	2.6

หมายเหตุ เครื่องหมาย * แสดงถึงส่วนผสมนั้นไม่ได้ทำการทดสอบ

ตาราง 3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพเหลวและกำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ (ชุดที่ 1)

Mix No.	% SF	w/(c+sf)	Admix. (lites)	Slump (cm.)	Flow (cm.)	Av. Compressive Strength		
						1 Day	7 Days	28 Days
A-0	0	0.26	9	17	48	454	610	818
A-5	5	0.26	9	12	42	489	749	909
A-10	10	0.26	9	4	32	519	779	985
A-15	15	0.26	9	-	-	-	-	-
A-20	20	0.26	9	-	-	-	-	-
A-25	25	0.26	9	-	-	-	-	-
B-0	0	0.29	9	22	52	385	591	740
B-5	5	0.29	9	17	47	437	701	848
B-10	10	0.29	9	8	36	480	766	943
B-15	15	0.29	9	5	31	402	753	938
B-20	20	0.29	9	-	-	-	-	-
B-25	25	0.29	9	-	-	-	-	-
C-0	0	0.32	9	24	55	290	534	649
C-5	5	0.32	9	21	50	340	593	740
C-10	10	0.32	9	14	45	398	710	839
C-15	15	0.32	9	11	38	363	753	897
C-20	20	0.32	9	7	34	363	705	812
C-25	25	0.32	9	4	30	372	606	744

ตาราง 3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพเหลวและกำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ (ชุดที่ 2)

Mix No.	% SF	w/(c+sf)	Admix. (lites)	Slump (cm.)	Flow (cm.)	Av. Compressive Strength		
						3 Day	7 Days	28 Days
D-0	0	0.26	9	17	48	571	610	818
D-5	5	0.26	11	20	50	558	649	844
D-10	10	0.26	15	20	49	545	658	883
D-15	15	0.26	18	21	51	450	593	1008
D-20	20	0.26	23	21	52	311	506	922
D-25	25	0.26	-	-	-	-	-	-
E-0	0	0.29	9	22	52	545	591	740
E-5	5	0.29	10	21	51	588	675	831
E-10	10	0.29	11	20	49	532	662	863
E-15	15	0.29	12	21	50	519	714	922
E-20	20	0.29	13	20	49	493	675	891
E-25	25	0.29	16	21	51	415	558	779
F-0	0	0.32	9	24	55	472	534	649
F-5	5	0.32	9	21	50	539	593	740
F-10	10	0.32	10	21	52	519	662	831
F-15	15	0.32	10.5	20	51	558	701	909
F-20	20	0.32	12	21	52	506	610	818
F-25	25	0.32	13	21	51	467	584	753

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์

Mix No.	Type	Age (Days)	% Ca(OH)2 g/g of cementitious	Mix No.	Type	Age (Days)	% Ca(OH)2 g/g of cementitious
Ca-0-1	CE	1	10.07	Ca-5-1	SF5	1	9.40
Ca-0-3	CE	3	11.51	Ca-5-3	SF5	3	10.64
Ca-0-7	CE	7	13.91	Ca-5-7	SF5	7	12.51
Ca-0-28	CE	28	15.29	Ca-5-28	SF5	28	12.34
Ca-0-56	CE	56	15.73	Ca-5-56	SF5	56	12.08
Mix No.	Type	Age (Days)	% Ca(OH)2 g/g of cementitious	Mix No.	Type	Age (Days)	% Ca(OH)2 g/g of cementitious
Ca-10-1	SF10	1	8.58	Ca-15-1	SF15	1	7.07
Ca-10-3	SF10	3	9.18	Ca-15-3	SF15	3	7.81
Ca-10-7	SF10	7	10.79	Ca-15-7	SF15	7	8.63
Ca-10-28	SF10	28	10.5	Ca-15-28	SF15	28	8.68
Ca-10-56	SF10	56	9.99	Ca-15-56	SF15	56	7.94
Mix No.	Type	Age (Days)	% Ca(OH)2 g/g of cementitious	Mix No.	Type	Age (Days)	% Ca(OH)2 g/g of cementitious
Ca-20-1	SF20	1	6.84	Ca-25-1	SF25	1	6.08
Ca-20-3	SF20	3	7.29	Ca-25-3	SF25	3	6.54
Ca-20-7	SF20	7	8.15	Ca-25-7	SF25	7	7.64
Ca-20-28	SF20	28	7.88	Ca-25-28	SF25	28	7.16
Ca-20-56	SF20	56	7.17	Ca-25-56	SF25	56	6.43

ตาราง 3.6 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 0 %) ชุดที่ 1

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A-0	0	0.26	415	571	649	753	805	870	909
			467	584	623	714	844	883	923
			480	558	558	730	805	857	870
		avg.	454	571	610	732	818	870	901
B-0	0	0.29	415	532	610	688	753	831	844
			363	545	604	707	792	779	831
			376	558	558	714	675	818	779
		avg.	385	545	591	703	740	809	818
C-0	0	0.32	286	435	565	623	649	701	740
			299	474	519	584	623	701	766
			286	506	519	610	675	688	779
		avg.	290	472	534	606	649	697	762

ตาราง 3.7 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 5 %) ชุดที่ 1

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A-5	5	0.26	480	597	766	883	883	891	960
			493	584	753	870	934	955	973
			493	584	727	831	909	929	973
		avg.	489	588	749	861	909	925	969
B-5	5	0.29	454	558	675	831	844	891	934
			428	584	753	805	844	828	947
			428	558	675	818	857	866	909
		avg.	437	567	701	818	848	862	930
C-5	5	0.32	353	558	558	714	740	764	818
			331	526	636	688	753	777	831
			336	532	584	636	727	764	844
		avg.	340	539	593	679	740	768	831

I17135358

ตาราง 3.8 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 10 %) ชุดที่ 1

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A-10	10	0.26	519	623	831	922	956	980	995
			519	623	766	883	980	1019	1025
			519	649	740	883	1020	1020	1025
		avg.	519	632	779	896	985	1006	1015
B-10	10	0.29	467	571	753	831	947	986	986
			480	597	740	896	947	973	1012
			493	610	805	909	934	986	999
		avg.	480	593	766	879	943	982	999
C-10	10	0.32	415	583	727	857	831	947	921
			389	556	714	727	908	947	947
			389	553	688	727	779	922	973
		avg.	398	564	710	770	839	939	947

ตาราง 3.9 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 15 %) ชุดที่ 1

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A-15	15	0.26	-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
		avg.	-	-	-	-	-	-	-
B-15	15	0.29	389	610	701	883	904	973	986
			428	610	805	818	929	947	986
			389	610	753	870	980	999	980
		avg.	402	610	753	857	938	973	984
C-15	15	0.32	363	545	740	844	934	973	986
			363	649	779	831	866	973	973
			363	571	740	753	891	960	973
		avg.	363	588	753	809	897	969	977

ตาราง 3.10 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 20 %) ชุดที่ 1

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A-20	20	0.26	-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
		avg.	-	-	-	-	-	-	-
B-20	20	0.29	-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
		avg.	-	-	-	-	-	-	-
C-20	20	0.32	363	571	688	701	805	909	947
			363	571	675	753	818	909	934
			363	571	753	753	813	909	934
		avg.	363	571	705	736	812	909	938

ตาราง 3.11 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 25 %) ชุดที่ 1

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A-25	25	0.26	-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
		avg.	-	-	-	-	-	-	-
B-25	25	0.29	-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
		avg.	-	-	-	-	-	-	-
C-25	25	0.32	376	558	636	740	831	853	909
			376	565	610	753	766	840	883
			363	571	571	649	636	823	844
		avg.	372	565	606	714	744	839	879

ตาราง 3.12 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 0 %) ชุดที่ 2

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
D-0	0	0.26	415	571	649	753	805	870	909
			467	584	623	714	844	883	923
			480	558	558	730	805	857	870
		avg.	454	571	610	732	818	870	901
E-0	0	0.29	415	532	610	688	753	831	844
			363	545	604	707	792	779	831
			376	558	558	714	675	818	779
		avg.	385	545	591	703	740	809	818
F-0	0	0.32	286	435	565	623	649	701	740
			299	474	519	584	623	701	766
			286	506	519	610	675	688	779
		avg.	290	472	534	606	649	697	762

ตาราง 3.13 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 5 %) ชุดที่ 2

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
D-5	5	0.26	*	558	649	753	844	909	947
			*	571	649	766	818	909	947
			*	545	649	740	870	909	928
		avg.	*	558	649	753	844	909	941
E-5	5	0.29	402	597	649	740	831	857	909
			376	610	675	766	844	870	883
			376	558	701	714	818	883	922
		avg.	385	588	675	740	831	870	904
F-5	5	0.32	319	558	558	714	740	764	818
			331	526	636	688	753	777	831
			319	532	584	636	727	764	844
		avg.	323	539	593	679	740	768	831

ตาราง 3.14 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 10 %) ชุดที่ 2

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
D-10	10	0.26	*	545	675	805	896	934	986
			*	545	649	779	870	960	973
			*	545	649	831	883	986	980
		avg.	*	545	658	805	883	960	980
E-10	10	0.29	415	519	636	766	844	896	934
			428	519	662	779	870	928	947
			441	558	688	811	876	960	960
		avg.	428	532	662	785	863	928	947
F-10	10	0.32	363	506	675	766	857	909	934
			363	519	675	779	818	909	922
			389	532	636	753	818	909	947
		avg.	372	519	662	766	831	909	934

ตาราง 3.15 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 15 %) ชุดที่ 2

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
D-15	15	0.26	*	454	584	947	999	1051	1064
			*	441	584	947	1012	1012	1064
			*	454	610	960	1012	1038	1090
		avg.	*	450	593	952	1008	1034	1073
E-15	15	0.29	*	519	701	870	922	947	960
			*	506	714	896	922	960	973
			*	532	727	844	922	934	986
		avg.	*	519	714	870	922	947	973
F-15	15	0.32	*	558	701	779	909	922	960
			*	571	688	818	934	934	973
			*	545	714	818	883	947	947
		avg.	*	558	701	805	909	934	960

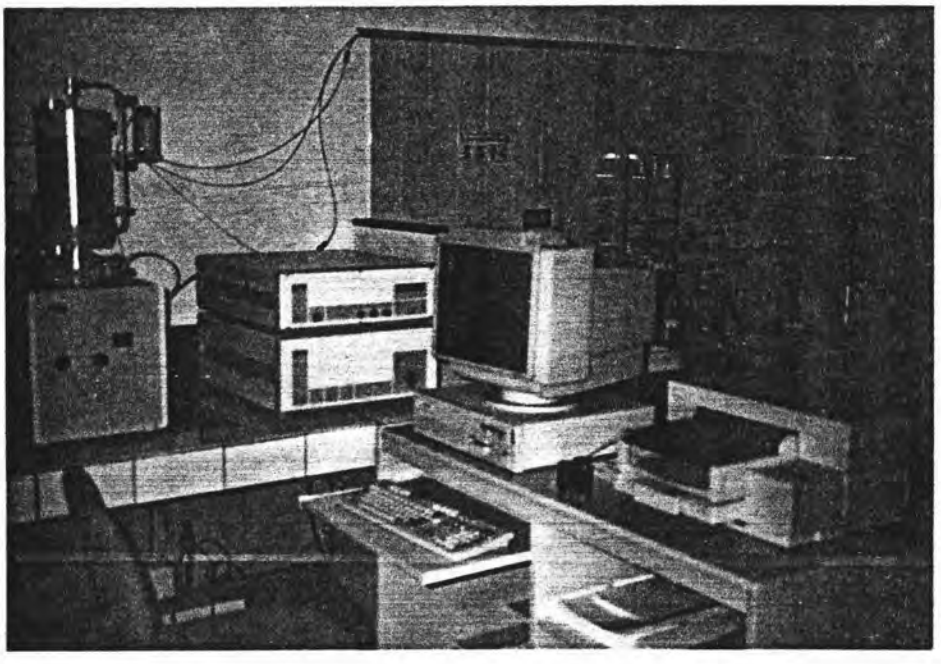
ตาราง 3.16 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 20 %) ชุดที่ 2

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
D-20	20	0.26	*	337	519	896	909	973	1012
			*	311	480	805	922	986	973
			*	286	519	857	934	922	934
		avg.	*	311	506	852	922	960	973
E-20	20	0.29	*	506	675	831	909	922	934
			*	506	701	841	857	934	947
			*	467	649	857	909	909	934
		avg.	*	493	675	844	891	922	939
F-20	20	0.32	*	506	610	714	792	883	934
			*	506	623	740	831	896	934
			*	506	597	727	831	909	896
		avg.	*	506	610	727	818	896	922

ตาราง 3.17 กำลังอัดของคอนกรีต (ซิลิกาฟูม 25 %) ชุดที่ 2

Mix No.	(%) Replace	w/(c+sf)	Age (days)						
			1	3	7	14	28	56	91
D-25	25		-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-
		avg.	-	-	-	-	-	-	-
E-25	25	0.29	*	389	545	714	779	857	883
			*	415	558	714	792	870	870
			*	441	571	714	766	844	870
		avg.	*	415	558	714	779	857	874
F-25	25	0.32	*	467	558	636	753	818	844
			*	467	584	649	740	831	857
			*	467	610	662	766	805	831
		avg.	*	467	584	649	753	818	844

รูปที่ 3.1 การชั่งตัวอย่างทดสอบบนเครื่องชั่งละเอียด



รูปที่ 3.2 การทดสอบปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์โดยวิธี TGA