บทที่ 3

การทดสอบและผลการทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูง

การทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขี้เถ้าลอยจากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 15-35 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ โดยสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบได้อาศัยสัดส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง ที่ได้จากงานวิจัยของณรงศักดิ์ [38] และกิตติกร[39] เป็นแนวทางในการออกแบบสัดส่วนผสมที่ทำการทดสอบ โดยสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้จะให้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูง ซึ่งสัดส่วนผสมที่ใช้มีดังนี้

- อัตราส่วนของทรายต่อมวลรวมคงที่เท่ากับ 0.45 เพื่อให้ขนาดคละของมวลรวมเข้าใกล้มัธยฐานของมาตรฐานมากที่สุด
- ใช้มวลรวมทยาบเป็นหินปูนขนาดใหญ่สุด 1/2" จากแหล่งหินใน จ.สระบุรี ปริมาณ 1,025 กก. ต่อปริมาณคอนกรีต 1 ลบ.ม.
- ใช้มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำจาก จ.กาญจนบุรี ซึ่งมีโมดุลัสความละเอียดเท่ากับ 2.7-2.9 ปริมาณ 830 กก. ต่อ ลบ.ม.
- ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ปูนซีเมนต์ตราช้าง สีแดง) ปริมาณ 500 กก. ต่อ ลบ.ม. และใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 15-35 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์
- ใช้สารลดปริมาณน้ำอย่างมาก 1.6 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์และใช้อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียด (W/(C+FA)) เท่ากับ 0.26-0.32

ในการทดสอบจะมีตัวแปรดังนี้

1. ที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียด (W/C) คงที่ จะแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย ในปริมาณ 15 %, 20 %, 25 %, 30 % และ 35 % ของปริมาณซีเมนต์
2. ที่ปริมาณซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยคงที่ อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเป็นตัวแปรมีค่าเท่ากับ 0.26, 0.29 และ 0.32

ส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 3.1-3.5 และส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงจะทำการทดสอบหาค่ายุบตัว, ค่าการไหล, และกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

3.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผสมในคอนกรีต

วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตคุณภาพสูงจะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณภาพดี ผ่านการคัดเลือกอย่างดี และต้องมีการควบคุมคุณภาพในการผสม ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตได้แก่ ปูนซีเมนต์, น้ำ, หิน, ทราย, สารเคมีผสมเพิ่มและวัสดุผสมเพิ่ม โดยวัสดุที่ใช้ในงานทดสอบนี้ได้แก่

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานทดสอบนี้ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับโครงสร้างทั่วไป ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-150, มอก.15-2523 โดยใช้ปูนซีเมนต์ตราช้างสีแดงของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด

3.1.2 น้ำ

ใช้น้ำสะอาดในการผสมและบ่มคอนกรีต โดยน้ำที่ใช้จะต้องไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ปราศจากรส ไม่มีสารแขวนลอย และมีความขุ่นไม่เกิน 2,000 ppm.

3.1.3 มวลรวม

มวลรวมที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติคงทน ไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในซีเมนต์ และไม่มีสิ่งเจือปนที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพส โดยคุณสมบัติของมวลรวมจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-33 สามารถแบ่งมวลรวมออกได้เป็น มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หิน หรือ กรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ #4 และมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ #4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มม. หรือตะแกรงมาตรฐานเบอร์ #200

ในการวิจัยนี้ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนขนาดใหญ่สุด 1/2" จากแหล่งหิน จังหวัดสระบุรี และทรายแม่น้ำจากจังหวัดกาญจนบุรี

3.1.4 สารเคมีผสมเพิ่ม

ในงานวิจัยนี้ใช้สารเคมี Daracem 100 ของบริษัท W.R.Grace จำกัด ซึ่งเป็นสารลดปริมาณน้ำในอัตราสูงและหน่วงการก่อตัว Type G (Water Reducing High-Range and Retarding Admixtures) ตามมาตรฐานของ ASTM C-494 (Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete), มอก. 733-2530 หรือเรียกในการใช้งานว่าน้ำยา Superplasticizer เป็นสารที่เติมเพื่อให้คอนกรีตมีการไหลลื่นสูง หน่วงการก่อตัวและลดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต

3.1.5 ขี้เถ้าลอย

ใช้ขี้เถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต โดยขี้เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นขี้เถ้าลอยที่ได้จากขบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินลิกไนต์ โดยนำมาจากโรงผลิตไฟฟ้าหน่วยที่ 5 อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีลักษณะเป็นผงละเอียด ฟุ้งกระจายได้ง่าย มีสีน้ำตาลเข้ม มีความสม่ำเสมอ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา 0.2 % เก็บไว้ในภาชนะที่สามารถกันความชื้นได้ดี

3.2 วิธีการผสมคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ส่วนผสมคอนกรีตตามงานวิจัยของกิตติกรและณรงศักดิ์[38],[39] เป็นแนวทางในการออกแบบ โดยใช้ซีเมนต์ 500 ก.ก.ต่อ ลบ.ม., หิน 1,025 ก.ก.ต่อ ลบ.ม., ทราย 830 ก.ก. ต่อ ลบ.ม., สารลดน้ำปริมาณสูง 1.6 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์, อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียด (W/(C+FA))

เท่ากับ 0.26-0.32 และใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 15-35 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ซึ่งส่วนผสมคอนกรีตดังกล่าวจะให้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Tilt Mixer ในการผสมคอนกรีต และจะคำนวณเทียบสัดส่วนผสมจากส่วนผสมต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. โดยคิดตามปริมาตรของการผสม แล้วคำนวณออกเป็นน้ำหนักของวัสดุ

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเป็นสิ่งที่สำคัญ ถ้าเติมน้ำในส่วนผสมมากเกินไปจะส่งผลทำให้คอนกรีตที่ได้เยิ้มและไม่ได้กำลังอัดตามต้องการ แต่ถ้าใช้ปริมาณน้ำน้อยเกินไปจะส่งผลทำให้ความสามารถในการเทได้ลดลง ก่อให้เกิดโพรงในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นต้องควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้อย่างดี โดยก่อนทำการผสมคอนกรีตจะต้องหาความชื้นในทรายทุกครั้ง แล้วนำมาคำนวณปรับปรุงส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้ได้น้ำหนักที่แท้จริงของวัสดุในการผสม นอกจากปริมาณน้ำที่ผสมคอนกรีต คุณลักษณะของมวลรวมก็มีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยมวลรวมที่ดีต้องมีลักษณะกลม ไม่เป็นเหลี่ยม สะอาด มวลรวมที่มีขนาดคละที่ดีจะส่งผลทำให้คอนกรีตที่ได้ มีคุณสมบัติที่ดี

ขั้นตอนในการผสมคอนกรีตมีดังนี้

1. การเตรียมโม่โดยล้างโม่ให้สะอาด แล้วเทน้ำออกเพื่อให้ผิวของโม่ไม่ดูดความชื้นจากส่วนผสม
2. ใส่ทรายที่ชั่งน้ำหนักที่ต้องการไว้แล้วในโม่ ปั่นให้เข้ากันประมาณ 1 นาที แล้วนำทรายประมาณ 500 กรัม มาหาความชื้น
3. ปรับความชื้น โดยคำนวณหาปริมาณทรายที่ต้องใส่เพิ่มอันเนื่องมาจากความชื้นและหาปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ โดยลบความชื้นเนื่องจากทรายออก
4. ใส่หินที่ได้ชั่งน้ำหนักที่ต้องการแล้วในโม่ ปั่นให้หินและทรายเข้ากันประมาณ 1 นาที
5. เติมปูนซีเมนต์และขี้เถ้าลอยตามที่ชั่งไว้ลงในโม่หลังจากที่ใส่มวลรวมเรียบร้อยแล้ว
6. เติมน้ำประมาณ 80 % หลังจากที่ส่วนผสมเริ่มคลุกเคล้ากันบางส่วน
7. หลังจากส่วนผสมคลุกเคล้าจนสม่ำเสมอแล้ว ให้เติมน้ำยาลดปริมาณน้ำอย่างมากลงไป และเติมน้ำส่วนที่เหลือ
8. เดินเครื่องผสมจนเนื้อคอนกรีตเข้ากันได้ดีและมีความสม่ำเสมอ โดยใช้เวลาตั้งแต่เริ่มผสมน้ำที่ 80 % ไม่ต่ำกว่า 1 นาที และไม่ควรใช้เวลาเกิน 5 นาที

3.3 การทดสอบหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์

เมื่อนำซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยมาผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ได้สารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตเป็นสารที่เพิ่มกำลังอัดในคอนกรีต แต่สารแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรตมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ยุ่งยาก ดังนั้นจึงทำการทดสอบหาสารแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์แทน แล้วทำการคำนวณเทียบสัดส่วน เพื่อหาปริมาณแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรต วิธีการทดสอบหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์สามารถทดสอบหาได้ด้วยวิธี Thermogravimetry Analysis โดยสามารถหาแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ได้จากน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการสลายตัวของแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ไปเป็นแคลเซี่ยมออกไซด์และ

น้ำ หลังจากทำการเผาด้วยความร้อนสูง อุปกรณ์ทดสอบจะประกอบไปด้วยแบบหล่อขนาด 5x5x5 ซม., ตู้อบและเครื่อง TGA ในการทดสอบได้ใช้ส่วนผสมซีเมนต์เพส D1-D6 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งใช้ปริมาณซีเมนต์ 1,500 กรัม, น้ำ 480 ml., และขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 15%, 20%, 25%, 30% และ 35 % โดยซีเมนต์เพสที่ผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 0% และ 15% (ส่วนผสมที่ D1, D2) จะทำการทดสอบหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์เมื่อตัวอย่างมีอายุ 1, 3, 7, 28 และ 56 วัน แต่เนื่องจากขี้เถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาทางเคมีในอายุเริ่มต้น จึงเน้นการทดสอบในระยะยาว ดังนั้นตัวอย่างที่ผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 20%, 25%, 30% และ 35% (ส่วนผสมที่ D3-D6) จะทดสอบเมื่ออายุ 28 และ 56 วัน เท่านั้น

วิธีการทดสอบทำโดยหล่อซีเมนต์เพสตามสัดส่วนที่ได้กำหนดไว้ หลังจากตัวอย่างมีอายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาบ่มในน้ำสะอาดและเมื่อซีเมนต์เพสมีอายุ 1, 3, 7, 28 และ 56 วัน นำตัวอย่างทดสอบมาทำเป็นผง แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ #100 ใส่ไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1:30 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกจากตู้อบเก็บไว้ในภาชนะที่มีสารดูดความชื้น แล้วนำตัวอย่างมาชั่งให้ได้ประมาณ 200 mg. ใส่ไว้ในเครื่อง TGA ดูดอากาศออกจนเป็นสูญญากาศแล้วค่อย ๆ ปล่อยแกสไนโตรเจนในอัตรา 383 ml/นาที ทำเช่นนี้ 2 ครั้ง ตัวอย่างจะอยู่ในสภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน เริ่มเผาตัวอย่างทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 650 °C โดยเพิ่มความร้อนในอัตรา 10 °C/นาที บันทึกผลการทดสอบที่ได้เป็น TG Curve และ DSC Curve โดยกราฟ TG Curve จะแสดงถึงน้ำหนักที่หายไปในแต่ละช่วงอุณหภูมิซึ่งสามารถวัดปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ได้จากน้ำหนักที่หายไปในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 450-600 °C [22]

จากการทดสอบพบว่าในซีเมนต์เพสธรรมดา จะมีปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ (g/g cementitious) อยู่ระหว่าง 10.066-15.725 % และในซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 15 % จะมีปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อยู่ระหว่าง 10.181-12.638 % โดยจะมีแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์มากที่สุดเมื่อซีเมนต์เพสมีอายุ 7 วัน ส่วนผสมซีเมนต์เพสที่ผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 20-35 % จะมีปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อยู่ระหว่าง 8.832-11.445 % ดังแสดงในตารางที่ 3.6

3.4 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพสด

3.4.1 การทดสอบการยุบตัว (Slump Test)

ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเป็นค่าที่บ่งถึงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตและแรงยึดเหนี่ยวของเนื้อคอนกรีต โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C-143 เครื่องมือในการทดสอบประกอบด้วยกรวยตัดสูง 305 มม. ด้านบนเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. ด้านล่าง 203 มม. และเหล็กกระทุ้งปลายกลมมน เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. ทำการทดสอบโดยตักคอนกรีตใส่แบบให้ได้ 3 ชั้น แต่ละชั้นปริมาตรเท่า ๆ กัน ใช้เหล็กกระทุ้ง กระทุ้ง 25 ครั้ง ทุกชั้น โดยชั้นล่างให้กระทุ้งจนสุด ส่วนชั้นที่สองและสามให้กระทุ้งผ่านชั้นถัดไปเล็กน้อย ระหว่างการกระทุ้งชั้นบนสุดให้เติมคอนกรีตให้ล้นปากแบบตลอดเวลา ระยะเวลาในการหาค่ายุบตัวไม่ควรเกิน 2:30 นาที ทำการวัดการยุบตัวของคอนกรีตเทียบกับปากกรวย

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีความสามารถเทได้ดีขึ้นอย่างมาก โดยมีผลทดสอบค่าความยุบตัว (Slump Test) โดยเฉลี่ยประมาณ 18-21 ซม. สำหรับส่วนผสมที่ A1-A6 (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับ 0.26) ส่วนคอนกรีตส่วนผสมที่ B1-B6 (ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับ 0.29) จะมีผลทดสอบค่าความยุบตัวประมาณ 22-26 ซม. สำหรับส่วนผสมที่ C1-C6 (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับ 0.32) จะมีผลทดสอบค่าความยุบตัวประมาณเท่ากับ 24-27 ซม. ดังแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3.7

3.4.2 การทดสอบการไหลตัว (Flow Test)

เป็นการทดสอบหาค่าการไหลตัวของคอนกรีตเพื่อหาค่าความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตที่เหลวมาก โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T 120-42 อุปกรณ์ประกอบไปด้วยโต๊ะเขย่า (Flow Table) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 ซม., แบบหล่อรูปกรวยคว่ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 171 มม. สำหรับด้านบน และ 254 มม. สำหรับด้านล่าง, เหล็กกระทุ้งขนาด 16 มม. ยาว 60 ซม. วิธีทดสอบทำได้โดยวางกรวยคว่ำบนโต๊ะเขย่า ตักคอนกรีตใส่ลงในแบบโดยแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ในแต่ละชั้นกระทุ้งจำนวน 25 ครั้งต่อชั้น ปาดให้เรียบ ยกแบบหล่อขึ้นในแนวดิ่ง ทำการหมุนให้โต๊ะเขย่ายกกระแทกเป็นระยะความสูง 12.7 มม. จำนวน 15 ครั้ง ภายในเวลา 15 วินาที แล้ววัดหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตที่แผ่ออกโดยแบ่งคอนกรีตออกเป็น 6 ส่วนเท่า ๆ กัน ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 6 แนว ค่าการไหลตัวของคอนกรีตคือค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้ แล้วทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการไหลโดยหาความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางคอนกรีตก่อนกระแทกและหลังกระแทก คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางคอนกรีตก่อนกระแทก ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$\text{ค่าการไหล (\%)} = \left(\frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางหลังกระแทก} - \text{เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนกระแทก}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนกระแทก}}\right) \quad 3.1$$

จากผลการทดสอบพบว่าค่าการไหล จะมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 48-51 ซม. สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับ 0.26 ส่วนคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับ 0.29 จะมีผลทดสอบค่าการไหลประมาณ 52-56 ซม. สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับ 0.32 จะมีผลทดสอบค่าการไหลประมาณ 55-70 ซม. ดังแสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3.7

3.5 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็ง

3.5.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

การทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-39 โดยทดสอบหาค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 10x20 ซม. ซึ่งจะทำการทดสอบหากำลังอัดเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ ในการทดสอบได้

ใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 15-35 % และใช้อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.26-0.32 ซึ่งส่วนผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ในการทดสอบประกอบไปด้วย แบบหล่อก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 10x20 ซม., เหล็กกระทุ้ง, เครื่องผสมคอนกรีต, แบบทดสอบการยุบตัว, เครื่องมือเคลือบปลายของแท่งคอนกรีต และเครื่องกดทดสอบ ในการหล่อก้อนตัวอย่างให้ตักคอนกรีตใส่แบบหล่อโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง เมื่อครบทั้ง 3 ชั้น ให้ปาดหน้าให้เรียบ เมื่อตัวอย่างมีอายุ 24 ชม. แกะออกจากแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำ ตามมาตราฐาน ASTM C-192 ยกเว้นการทดสอบที่อายุ 1 วัน ให้นำไปเคลือบหัวด้วยกำมะถันได้เลย เมื่อถึงเวลาที่กำหนด ให้นำแท่งทดสอบไปกดทดสอบ โดยก่อนทดสอบ 1 วัน ให้นำตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำเช็ดให้แห้งทิ้งไว้ในอากาศ ก่อนทดสอบให้ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างและวัดขนาดเพื่อนำไปหาความหนาแน่นของคอนกรีต จากนั้นนำไปหล่อด้วยกำมะถันคลุมลูกปูนตามมาตรฐาน ASTM C-617 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบเป็นคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงดังนั้นจึงต้องทำการผสมกราไฟต์ในกำมะถันเพื่อป้องกันไม่ให้หัวคลุมแตกเสียหายระหว่างการทดสอบ จากนั้นจึงนำไปกดในเครื่องกดทดสอบ ทำการบันทึกแรงกดที่ได้จากการทดสอบ รายงานผลเป็นหน่วยแรงอัด (Stress) ของคอนกรีต

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตจะมีกำลังอัดเฉลี่ยที่ 1 วัน มากกว่า 300 ksc. และที่อายุ 28 วัน จะมีกำลังอัดเฉลี่ยมากกว่า 600 ksc. โดยปริมาณผสมของขี้เถ้าลอยเพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดที่ดี ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 15-25 % ของปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนัก ซึ่งคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 15 % จะมีค่ากำลังอัดมากที่สุด เมื่ออัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.26 โดยจะมีค่าเท่ากับ 904 ksc. เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน และคอนกรีตที่ผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 35 % จะมีกำลังอัดน้อยที่สุด โดยจะมีค่าเท่ากับ 649 ksc. เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดแสดงในตารางที่ 3.8-3.13

3.5.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of Elasticity)

เป็นการทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 469-81 เครื่องมือที่ใช้ประกอบไปด้วย เครื่องกดทดสอบ, เครื่องวัดการยืดหด (Compressometer) และแบบหล่อทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม. วิธีทดสอบทำได้โดยวางแท่งทดสอบที่ติดเครื่องวัดการยืดหดแล้วบนพื้นของเครื่องกดโดยวางให้แนวแกนของแท่งตัวอย่างอยู่ตรงกับศูนย์กลางของแป้นฐาน เดินเครื่องกดแท่งตัวอย่างด้วยอัตรา (2.46 ± 0.35 กก./ซม^2)/วินาที จนถึง 40 % ของกำลังอัดประลัย แล้วจึงลดแรงกดด้วยอัตราเดียวกัน ในการกดรอบแรกเป็นการกด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการคืบ ไม่ต้องบันทึกค่าใด ๆ ในรอบต่อไปให้บันทึกค่าแรงกดและค่าการหดตัวของแท่งตัวอย่างทดสอบ ในรอบสุดท้ายให้ถอดมาตรวัดที่ติดอยู่ออกก่อนแล้วกดหาค่ากำลังอัดประลัย บันทึกผลของแรงอัดและค่าความยืดหดของคอนกรีต เนื่องจากค่าความยืดหดที่วัดได้เป็นค่าความยืดหดที่วัดได้บริเวณผิวด้านนอกของตัวอย่างทดสอบ ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่าความยืดหดในแนวแกนของแท่งทดสอบ โดยเทียบอัตราส่วนความยืดหดในแนวแกนซึ่งค่าความยืดหดในแนวแกน จะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่ง

ของค่าความยืดหดที่ได้จากการวัด ทำการคำนวณหาหน่วยแรงอัดและความเครียด รายงานผลเป็นกราฟระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด

โดยทำการคำนวณหาโมดูลัสความยืดหยุ่นจากสมการที่ 3.2

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\varepsilon_2 - 5x10^{-5})} \qquad 3.2$$

เมื่อ

E = โมดูลัสความยืดหยุ่น กก./ซม^2

S_2 = หน่วยแรงที่ 40 % ของกำลังประลัย

S_1 = หน่วยแรงเมื่อความเครียดตามแนวแกนแท่งทดสอบมีค่าเท่ากับ $5x10^{-5}$ หน่วย

ε_2 = ความเครียดเมื่อหน่วยแรงมีค่าเท่ากับ S_2

การทดสอบได้ใช้ส่วนผสมคอนกรีต A1-A6, B1-B6 และ C1-C6 โดยจะใช้ขี้เถ้าลอยผสมซีเมนต์ในปริมาณ 15-35 % ทำการทดสอบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะแปรผันโดยตรงกับกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีค่าอยู่ในช่วง $4.56x10^5$ - $5.47x10^5$ ksc. ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.14

3.5.3 การทดสอบค่าความคงตัว (Soundness)

เป็นการทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซี่ยมออกไซด์, (CaO) และแมกนีเซี่ยมออกไซด์, (MgO) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 151-77 อุปกรณ์ประกอบไปด้วยแบบหล่อขนาด 25x25x285 มม. และเครื่อง Autoclave ที่สามารถรับแรงดันได้สูงสุด 600 psi (4.1 MPa) ทำการทดสอบโดยผสมซีเมนต์เพส โดยใช้ซีเมนต์ 650 กรัม ผสมกับน้ำที่เพียงพอที่จะทำให้ซีเมนต์เพสมีค่าความข้นเหลวปกติ ตามมาตรฐาน ASTM C 230-66 แล้วนำไปบ่มไว้ในห้องที่มีความชื้น หลังจากตัวอย่างทดสอบมีอายุ 1 วัน วัดค่าความยาวของตัวอย่างให้ละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง เป็นค่าเริ่มต้น นำตัวอย่างใส่ไว้ในเครื่อง Autoclave ใส่น้ำลงไปประมาณ 7-10 % ของปริมาตร เพิ่มความร้อนไปเรื่อย ๆ จนเครื่อง Autoclave มีความดัน 295 psi (2 MPa) คงความดันไว้ 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นปิดเครื่องและทำให้เย็นจนมีความดันเท่ากับความดันห้อง และอุณหภูมิเหลือ 90 °C นำตัวอย่างออกจากเครื่อง แช่ลงในน้ำ หล่อเย็นให้อุณหภูมิเหลือ 23 °C ภายใน 15 นาที แล้วแช่ตัวอย่างไว้อีก 15 นาที หลังจากนั้นนำมาเช็ดให้แห้ง แล้วทำการวัดขนาดอีกครั้งจดบันทึกไว้คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความยาวเริ่มต้น

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยในปริมาณมากขึ้น ซีเมนต์เพสจะมีการหดตัวมากขึ้น ซึ่งซีเมนต์ที่ผสมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 15-25 % จะมีค่าการหดตัวประมาณ

0.005-0.009 % แต่เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยในปริมาณ 30-40 % การหดตัวจะมีค่าประมาณ 0.01-0.03 % ดังแสดงในตารางที่ 3.15

3.5.4 การทดสอบหาค่าการหดตัว (Shrinkage)

การสูญเสียน้ำในสภาวะปกติของซีเมนต์เพสจะก่อให้เกิดการหดตัว (Drying Shrinkage) ซึ่งการทดสอบหาค่าการหดตัวของซีเมนต์เพสจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-596 อุปกรณ์ที่ทำการทดสอบประกอบไปด้วยแบบหล่อขนาด 25x25x285 มม. ที่มีความยาวประสิทธิผล 250 มม. และเครื่องมือวัดความยาว (Length Comparator) การทดสอบได้ใช้ส่วนผสม E1-E6 ซึ่งมีปริมาณซีเมนต์ 750 กรัม และทรายมาตรฐาน 1,500 กรัม และแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยตามสัดส่วนที่กำหนด โดยใช้ปริมาณน้ำที่เพียงพอให้มอร์ตามีค่าการไหล 110 $\pm$ 5 % (สัดส่วนผสมแสดงในตารางที่ 3.3) เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 24 ชั่วโมง ให้แกะออกจากแบบแล้วนำมาแช่ลงในน้ำสะอาดเป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาเช็ดให้แห้ง ทำการวัดขนาดเมื่ออายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ซีเมนต์เพสจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเนื่องจากการสูญเสียน้ำในซีเมนต์เพส รายงานผลที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับความยาวประสิทธิผล

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นค่าการหดตัวของมอร์ต้าจะเพิ่มขึ้น โดยเมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุ 7 วัน การหดตัวจะมีค่าประมาณ 0.017-0.026 % เมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุ 14 วัน การหดตัวจะมีค่าประมาณ 0.034-0.036 % เมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุ 21 วัน ค่าการหดตัวจะมีค่าประมาณ 0.040-0.043 % และเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน จะมีค่าการหดตัวประมาณ 0.042-0.046 % ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัด

Mix No.	Water (kg.)	Cement (kg.)	FA %	FA (kg.)	Course Agg (kg.)	Fine Agg. (kg.)	W/(C+FA)	S/A	Admixture	
									%	(litres)
A1	130	500	0	0	1025	830	0.26	0.45	1.6	8.00
A2	130	425	15	75	1025	830	0.26	0.45	1.6	8.00
A3	130	400	20	100	1025	830	0.26	0.45	1.6	8.00
A4	130	375	25	125	1025	830	0.26	0.45	1.6	8.00
A5	130	350	30	150	1025	830	0.26	0.45	1.6	8.00
A6	130	325	35	175	1025	830	0.26	0.45	1.6	8.00
B1	145	500	0	0	1025	830	0.29	0.45	1.6	8.00
B2	145	425	15	75	1025	830	0.29	0.45	1.6	8.00
B3	145	400	20	100	1025	830	0.29	0.45	1.6	8.00
B4	145	375	25	125	1025	830	0.29	0.45	1.6	8.00
B5	145	350	30	150	1025	830	0.29	0.45	1.6	8.00
B6	145	325	35	175	1025	830	0.29	0.45	1.6	8.00
C1	160	500	0	0	1025	830	0.32	0.45	1.6	8.00
C2	160	425	15	75	1025	830	0.32	0.45	1.6	8.00
C3	160	400	20	100	1025	830	0.32	0.45	1.6	8.00
C4	160	375	25	125	1025	830	0.32	0.45	1.6	8.00
C5	160	350	30	150	1025	830	0.32	0.45	1.6	8.00
C6	160	325	35	175	1025	830	0.32	0.45	1.6	8.00

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมซีเมนต์เพสที่ทำการทดสอบหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์

Mix No.	W/(C+FA)	Water (ml.)	Cement (g.)	FA %	FA (g.)	Admixture (ml.)
D1	0.32	480	1500	0	0	4.00
D2	0.32	480	1275	15	225	4.00
D3	0.32	480	1200	20	300	4.00
D4	0.32	480	1125	25	375	4.00
D5	0.32	480	1050	30	450	4.00
D6	0.32	480	975	35	525	4.00

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมมอร์ต้าที่ทำการทดสอบหาค่าการหดตัว (Shrinkage)

Mix No.	W/(C+FA)	Water (ml.)	Cement (g.)	FA %	FA (g.)	Sand (g.)	Admixture (ml.)
E1	0.32	240	750	0	0	1500	10.00
E2	0.32	240	638	15	113	1500	10.00
E3	0.32	240	600	20	150	1500	10.00
E4	0.32	240	563	25	188	1500	10.00
E5	0.32	240	525	30	225	1500	10.00
E6	0.32	240	488	35	263	1500	10.00

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมซีเมนต์เพสที่ทำการทดสอบหาค่าความคงตัว (Soundness)

Mix No.	W/(C+FA)	Water (ml.)	Cement (g.)	FA %	FA (g.)	Admixture (ml.)
F1	0.32	210	675	0	0	4.00
F2	0.32	210	574	15	101	4.00
F3	0.32	210	540	20	135	4.00
F4	0.32	210	506	25	169	4.00
F5	0.32	210	473	30	203	4.00
F6	0.32	210	439	35	236	4.00
F7	0.32	210	405	40	270	4.00

17211475

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมคอนกรีตตามรายการทดสอบ

อัตส่วน W/(C+FA)	ปริมาณ FA (%)	การทดสอบ					
		IGA.	คุณสมบัติเชิงกล		คุณสมบัติทางกายภาพ		
		ปริมาณ Ca(OH)2	กำลังอัด	ค่า E	Slump,Flow	Shrinkage	Soundness
0.26	0	-	A1-1,3,7,14,28,56,91*	A1-28	A1	-	-
	15	-	A2-1,3,7,14,28,56,91	A2-28	A2	-	-
	20	-	A3-1,3,7,14,28,56,91	A3-28	A3	-	-
	25	-	A4-1,3,7,14,28,56,91	A4-28	A4	-	-
	30	-	A5-1,3,7,14,28,56,91	A5-28	A5	-	-
	35	-	A6-1,3,7,14,28,56,91	A6-28	A6	-	-
0.29	0	-	B1-1,3,7,14,28,56,91	B1-28	B1	-	-
	15	-	B2-1,3,7,14,28,56,91	B2-28	B2	-	-
	20	-	B3-1,3,7,14,28,56,91	B3-28	B3	-	-
	25	-	B4-1,3,7,14,28,56,91	B4-28	B4	-	-
	30	-	B5-1,3,7,14,28,56,91	B5-28	B5	-	-
	35	-	B6-1,3,7,14,28,56,91	B6-28	B6	-	-
0.32	0	D1-1,3,7,28,56**	C1-1,3,7,14,28,56,91	C1-28	C1	E1-3,7,14,28	F1-1
	15	D2-1,3,7,28,56	C2-1,3,7,14,28,56,91	C2-28	C2	E2-3,7,14,28	F2-1
	20	D3-28,56	C3-1,3,7,14,28,56,91	C3-28	C3	E3-3,7,14,28	F3-1
	25	D4-28,57	C4-1,3,7,14,28,56,91	C4-28	C4	E4-3,7,14,28	F4-1
	30	D5-28,58	C5-1,3,7,14,28,56,91	C5-28	C5	E5-3,7,14,28	F5-1
	35	D6-28,59	C6-1,3,7,14,28,56,91	C6-28	C6	E6-3,7,14,28	F6-1
	40	-	-	-	-	-	F7-1

หมายเหตุ * A1-1 หมายถึง ส่วนผสม A1 ทดสอบกำลังที่ 1 วัน

A1-91 หมายถึง ส่วนผสม A1 ทดสอบกำลังที่ 91 วัน

** D1-1 หมายถึง ส่วนผสม D1 ทดสอบ Ca(OH)2 ที่ 1 วัน

D1 56 หมายถึง ส่วนผสม D1 ทดสอบ Ca(OH)2 ที่ 56 วัน

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์

Mix No.	Type	Age (Days)	Temp. Range (°C)		%Ca(OH)2 g/g cementitous
D1-1	CE	1	459.90	547.90	10.066
D1-3	CE	3	460.00	547.40	11.505
D1-7	CE	7	460.00	548.90	13.910
D1-28	CE	28	468.00	569.70	15.295
D1-56	CE	56	463.80	558.80	15.725
D2-1	FA15	1	470.00	550.00	10.181
D2-3	FA15	3	470.10	550.00	11.325
D2-7	FA15	7	475.10	549.90	12.638
D2-28	FA15	28	490.90	545.10	12.201
D3-28	FA20	28	493.00	543.40	11.445
D4-28	FA25	28	467.00	561.40	10.727
D5-28	FA30	28	464.50	555.10	10.004
D6-28	FA35	28	453.10	578.00	9.252
D2-56	FA15	56	495.40	546.80	11.807
D3-56	FA20	56	497.40	542.10	11.074
D4-56	FA25	56	484.40	538.80	10.355
D5-56	FA30	56	480.30	539.00	9.593
D6-56	FA35	56	458.40	576.50	8.832

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย

Mix No.	Cement (kg.)	% Fly Ash	Fly Ash (kg.)	W/(C+FA)	Slump (cm.)	Flow (cm.)	Av. Compressive Strength (ksc.)		
							1 Day	7 Days	28 Days
A1	500	0	0	0.26	17	47	454	610	818
A2	425	15	75	0.26	18	48	337	735	904
A3	400	20	100	0.26	19	49	329	681	813
A4	375	25	125	0.26	20	50	316	658	778
A5	350	30	150	0.26	21	51	303	575	710
A6	325	35	175	0.26	22	53	294	519	649
B1	500	0	0	0.29	22	52	385	591	740
B2	425	15	75	0.29	22	52	331	692	844
B3	400	20	100	0.29	23	54	320	627	779
B4	375	25	125	0.29	24	55	311	610	740
B5	350	30	150	0.29	26	56	277	489	632
B6	325	35	175	0.29	26	57	266	467	610
C1	500	0	0	0.32	24	55	290	534	649
C2	425	15	75	0.32	24	55	329	645	766
C3	400	20	100	0.32	25	62	316	614	727
C4	375	25	125	0.32	26	65	307	571	705
C5	350	30	150	0.32	27	69	264	459	606
C6	325	35	175	0.32	27	70	251	450	584

ตารางที่ 3.8 กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ (ksc.)
เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย = 0 %

Mix No.	Replace (%)	W/(C+FA)	Age (Days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A1	0	0.26	415	571	649	753	805	870	909
			467	584	623	730	844	883	923
			480	558	558	714	805	857	870
		av.	**454**	**571**	**610**	**732**	**818**	**870**	**900**
B1	0	0.29	415	532	610	688	753	831	844
			363	545	604	707	792	779	779
			376	558	558	714	675	818	831
		av.	**385**	**545**	**591**	**703**	**740**	**809**	**818**
C1	0	0.32	286	435	565	623	649	701	740
			299	474	519	584	623	701	766
			286	506	519	610	675	688	779
		av.	**290**	**472**	**534**	**606**	**649**	**697**	**762**

ตารางที่ 3.9 กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ (ksc.)
เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย = 15 %

Mix No.	Replace (%)	W/(C+FA)	Age (Days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A2	15	0.26	311	597	727	844	909	960	986
			389	623	740	844	870	960	999
			311	675	740	844	934	934	1064
		av.	**337**	**632**	**735**	**844**	**904**	**952**	**1017**
B2	15	0.29	324	571	714	779	870	883	909
			331	571	701	766	831	883	883
			337	584	662	753	831	883	934
		av.	**331**	**575**	**692**	**766**	**844**	**883**	**909**
C2	15	0.32	324	519	636	727	792	844	870
			324	574	675	740	740	844	883
			337	558	623	688	766	844	857
		av.	**329**	**549**	**645**	**718**	**766**	**844**	**870**

ตารางที่ 3.10 กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ (ksc.)
เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย = 20 %

Mix No.	Replace (%)	W/(C+FA)	Age (Days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A3	20	0.26	337	532	688	740	792	883	934
			324	584	688	727	805	831	909
			324	-	668	740	844	857	883
		av.	**329**	**558**	**681**	**735**	**813**	**857**	**909**
B3	20	0.29	337	519	623	740	779	818	857
			324	545	623	727	753	831	844
			299	493	636	675	805	792	805
		av.	**320**	**519**	**627**	**714**	**779**	**813**	**835**
C3	20	0.32	311	519	636	701	753	779	805
			311	493	597	675	727	779	844
			324	-	610	675	701	805	779
		av.	**316**	**506**	**614**	**684**	**727**	**787**	**809**

ตารางที่ 3.11 กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ (ksc.)
เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย = 25 %

Mix No.	Replace (%)	W/(C+FA)	Age (Days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A4	25	0.26	311	519	649	688	766	792	844
			311	519	649	740	805	792	831
			324	519	675	714	753	831	896
		av.	**316**	**519**	**658**	**714**	**774**	**805**	**857**
B4	25	0.29	299	428	610	701	740	766	792
			299	441	610	688	740	805	857
			337	454	-	675	740	805	792
		av.	**311**	**441**	**610**	**688**	**740**	**792**	**813**
C4	25	0.32	311	454	584	688	714	805	753
			311	454	519	688	753	792	805
			299	402	610	532	649	675	779
		av.	**307**	**437**	**571**	**636**	**705**	**757**	**779**

ตารางที่ 3.12 กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ (ksc.)
เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย = 30 %

Mix No.	Replace (%)	W/(C+FA)	Age (Days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A5	30	0.26	311	467	571	649	714	779	831
			311	454	584	662	675	753	818
			286	441	571	636	740	766	805
		av.	**303**	**454**	**575**	**649**	**710**	**766**	**818**
B5	30	0.29	286	428	493	558	636	740	779
			273	415	493	545	636	701	753
			273	415	480	545	623	701	727
		av.	**277**	**420**	**489**	**549**	**632**	**714**	**753**
C5	30	0.32	273	376	480	532	610	675	714
			260	363	428	519	610	623	766
			260	363	467	-	597	701	701
		av.	**264**	**368**	**459**	**526**	**606**	**666**	**727**

ตารางที่ 3.13 กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ (ksc.)
เมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอย = 35 %

Mix No.	Replace (%)	W/(C+FA)	Age (Days)						
			1	3	7	14	28	56	91
A6	35	0.26	299	441	519	571	688	727	766
			286	428	519	571	675	727	766
			299	454	519	558	584	766	792
		av.	**294**	**441**	**519**	**567**	**649**	**740**	**774**
B6	35	0.29	273	363	493	506	636	714	779
			260	363	480	519	597	701	727
			-	402	428	532	597	675	727
		av.	**266**	**376**	**467**	**519**	**610**	**697**	**744**
C6	35	0.32	234	389	454	532	636	649	688
			273	324	467	467	545	623	688
			247	337	428	519	571	636	688
		av.	**251**	**350**	**450**	**506**	**584**	**636**	**688**

ตารางที่ 3.14 ผลการทดสอบหาค่าโมดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยเมื่ออายุ 28 วัน

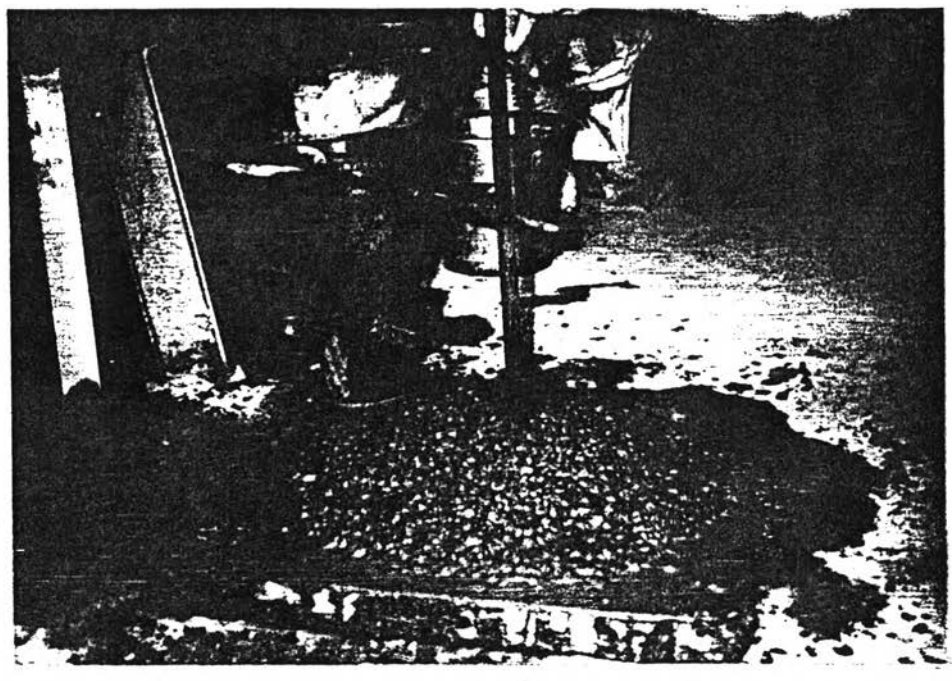
Comp. Strength	Modulus of Elasticity (ksc.)				
(ksc.)	จากทดสอบ	ACI 363	Nilson	สุพรรณ์	ชยานนท์
616	456,000	329,000	333,000	326,000	478,000
636	465,000	333,000	337,000	336,000	481,000
707	479,000	348,000	352,000	373,000	489,000
726	486,000	351,000	356,000	383,000	492,000
740	493,000	354,000	358,000	390,000	493,000
765	505,000	359,000	363,000	402,000	496,000
811	506,000	368,000	372,000	424,000	501,000
843	522,000	373,000	378,000	439,000	505,000
904	547,000	384,000	389,000	467,000	511,000

ตารางที่ 3.15 ผลการทดสอบหาความคงตัวของซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย

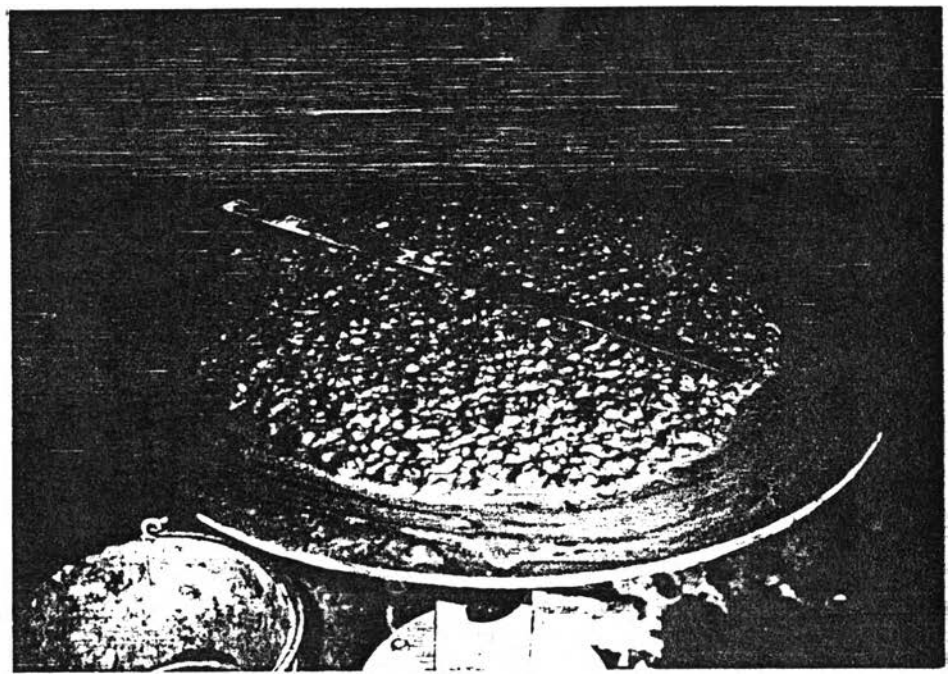
Percent of Fly Ash	FA0%	FA15%	FA20%	FA25%	FA30%	FA35%	FA40%
Total Decrease(%)	0.0052	0.0057	0.0071	0.0093	0.0197	0.0260	0.0320

ตารางที่ 3.16 ผลการทดสอบหาการหดตัว (Shrinkage) ของมอร์ตาผสมขี้เถ้าลอย

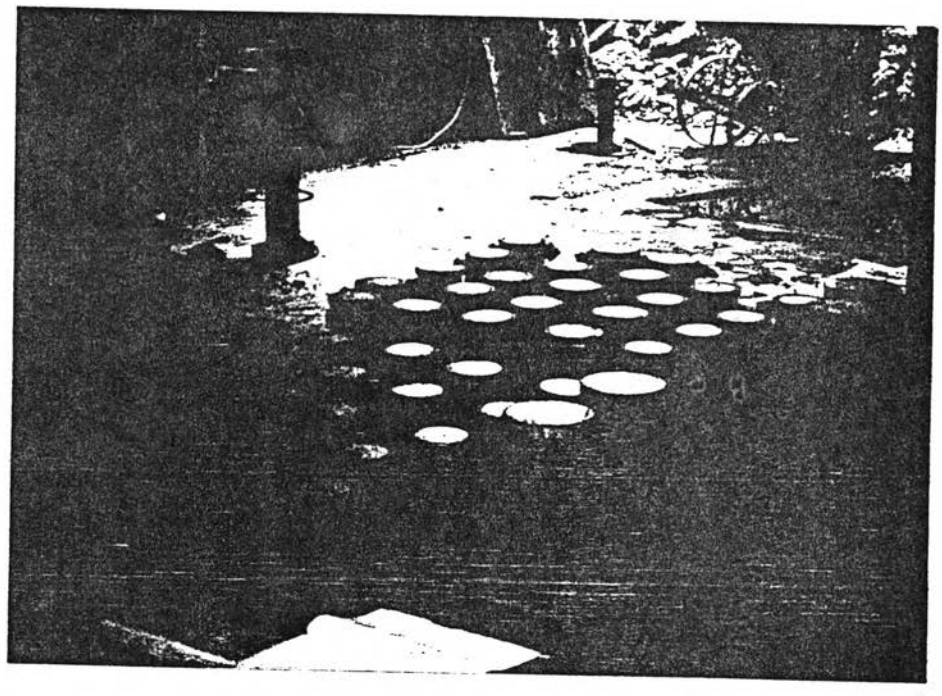
Time	Shrinkage (x10E-3)					
(Week)	FA0%	FA15%	FA20%	FA25%	FA30%	FA35%
1	2.03	1.73	1.93	2.44	2.54	2.64
2	3.35	3.45	3.56	3.56	3.66	3.66
3	3.96	4.06	4.17	4.27	4.27	4.37
4	4.17	4.27	4.37	4.47	4.57	4.67



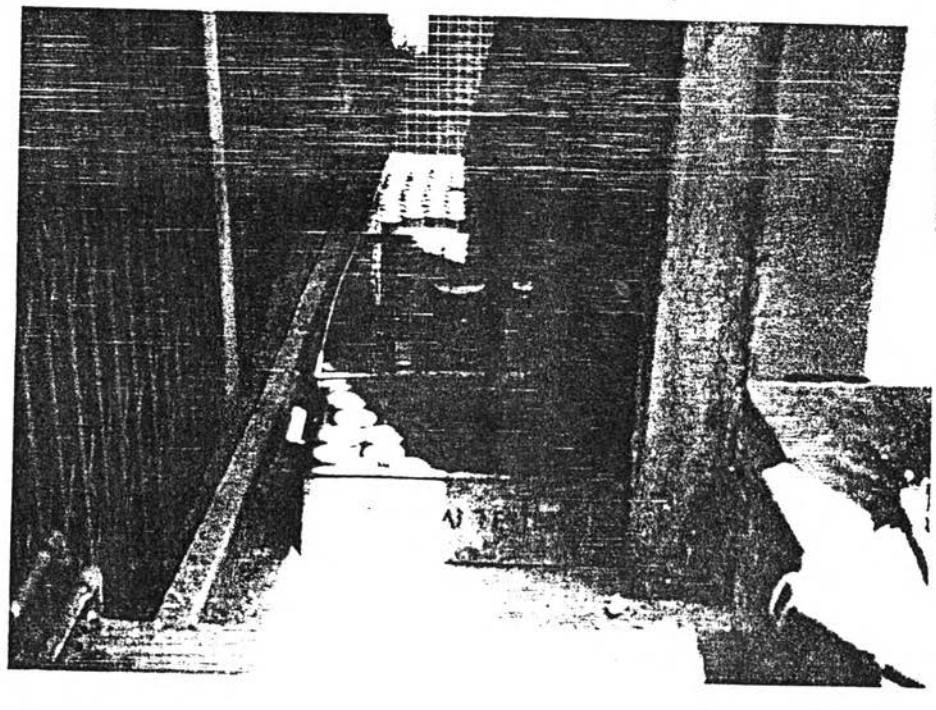
รูปที่ 3.1 แสดงผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต



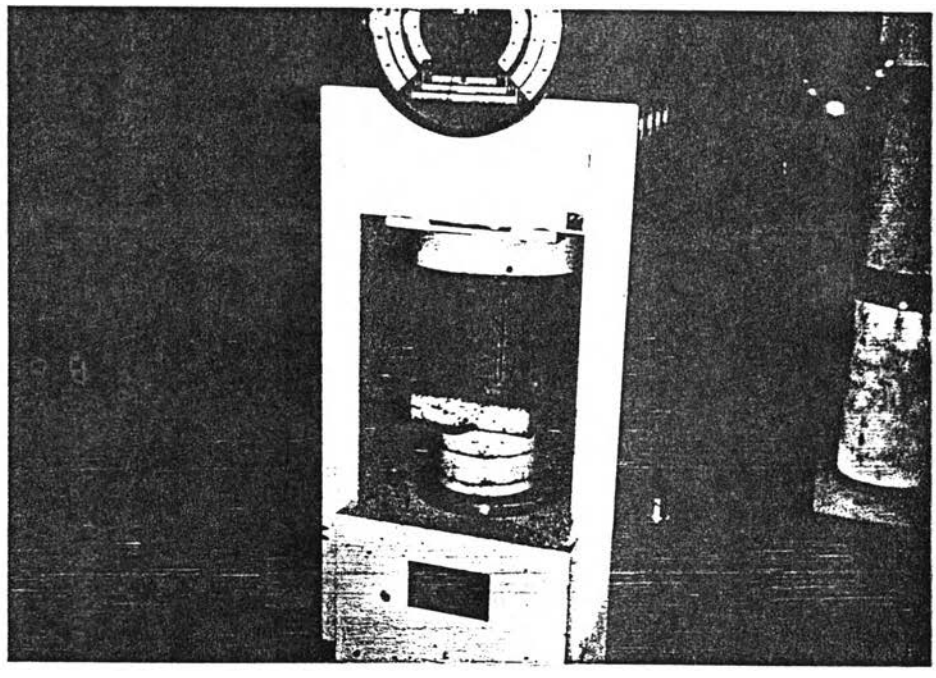
รูปที่ 3.2 แสดงผลการทดสอบค่าการไหลของคอนกรีต



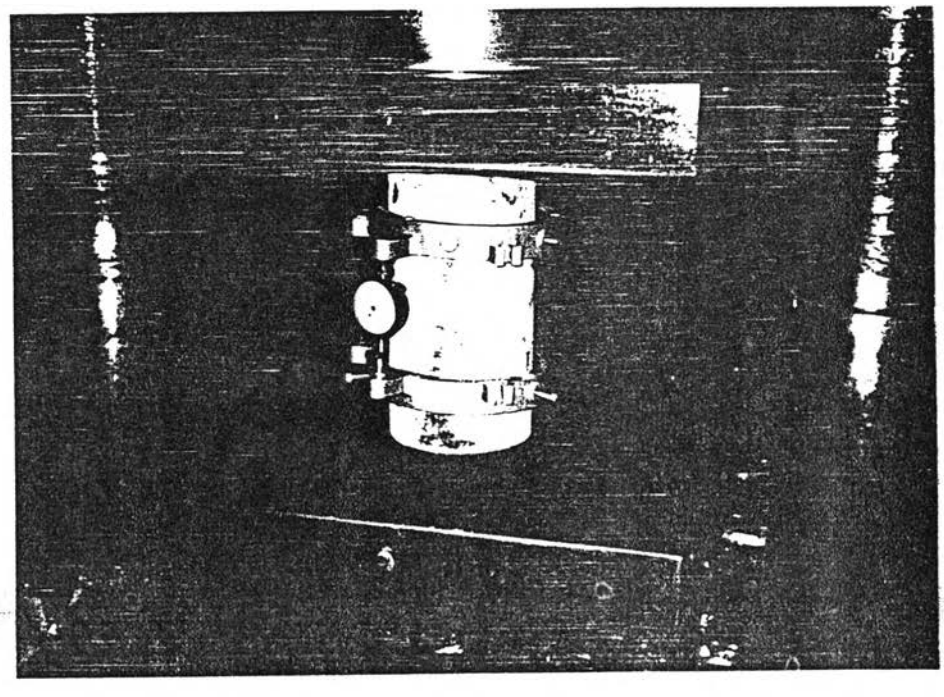
รูปที่ 3.3 แสดงการเก็บตัวอย่างคอนกรีต



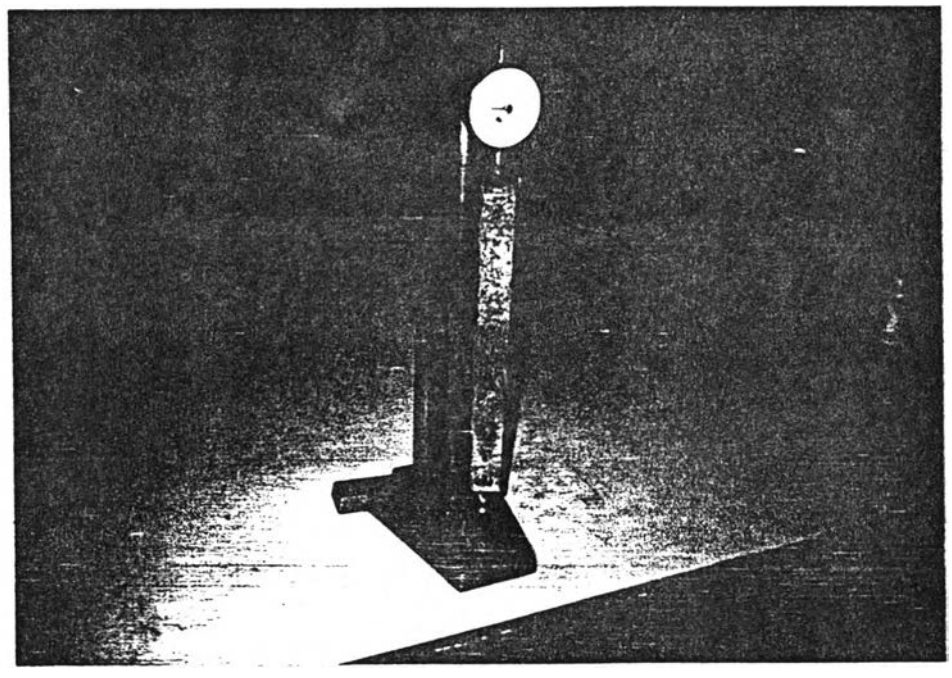
รูปที่ 3.4 แสดงการบ่มคอนกรีต



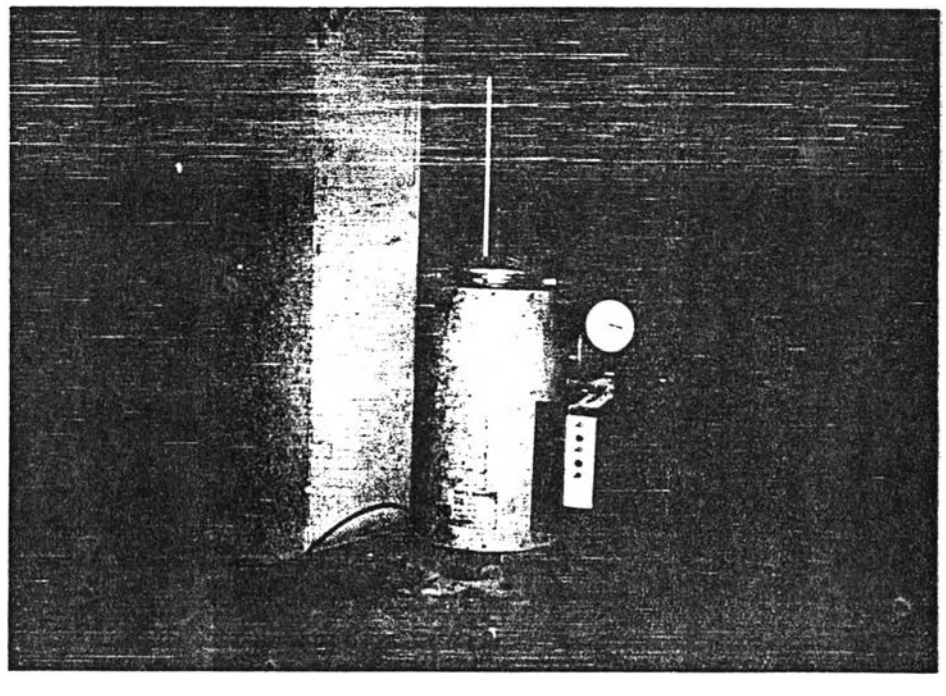
รูปที่ 3.5 แสดงการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



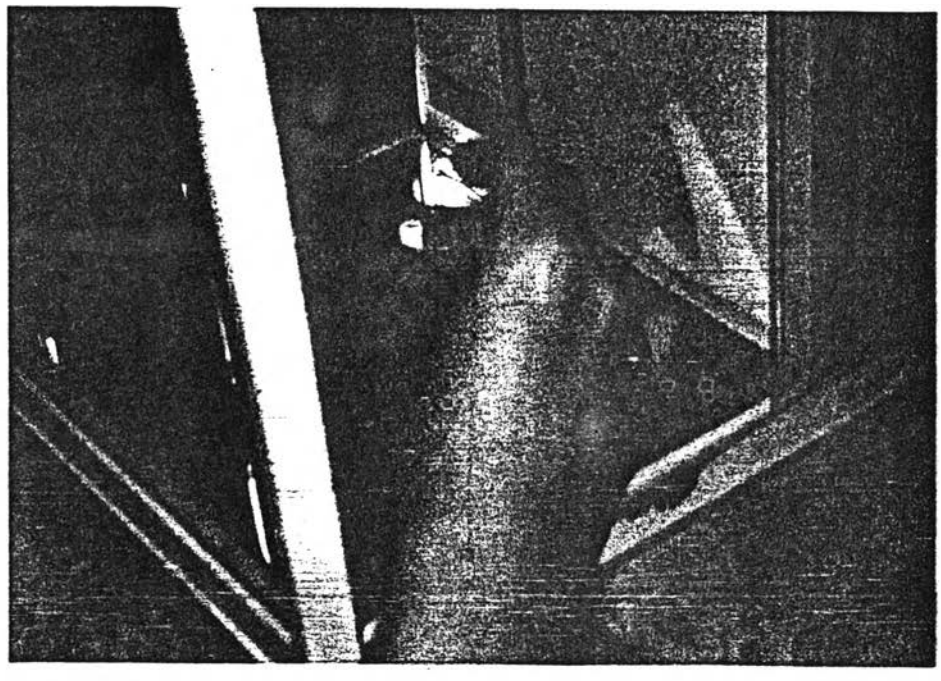
รูปที่ 3.6 แสดงการทดสอบหาค่าโมดุลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



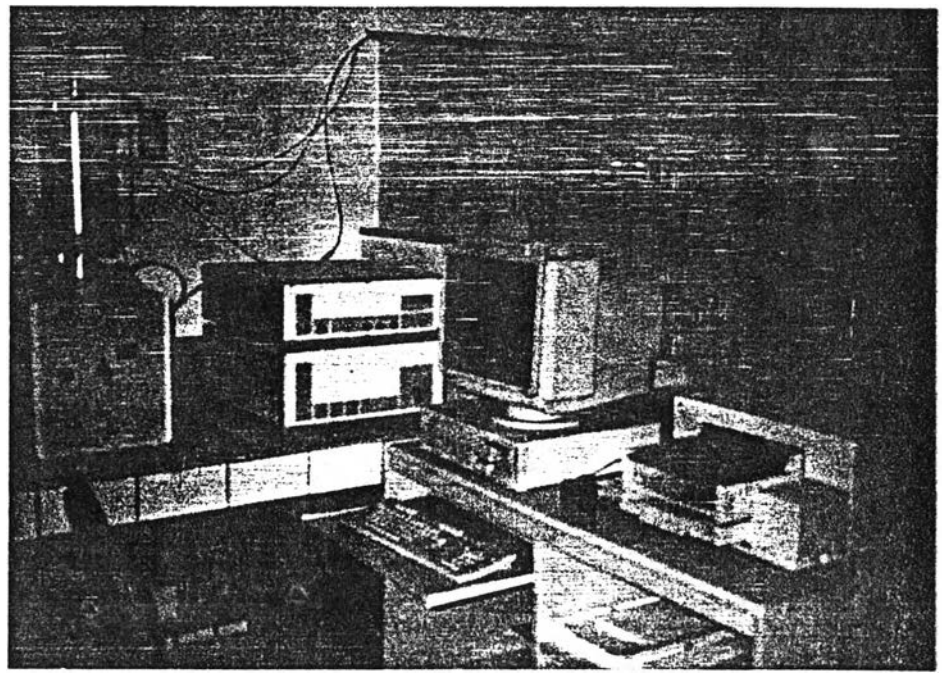
รูปที่ 3.7 แสดงการทดสอบหาค่าการหดตัวของมอร์ต้าผสมขี้เถ้าลอย



รูปที่ 3.8 แสดงการทดสอบหาค่าความอยู่ตัวของซีเมนต์เพสผสมขี้เถ้าลอย
ด้วยเครื่องอบไอน้ำ Autoclave



รูปที่ 3.9 แสดงการชั่งตัวอย่างทดสอบ เพื่อนำไปหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.10 แสดงการทดสอบหาปริมาณแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ ด้วยเครื่องมือ Thermal Analysis