บทที่ 3

การทดสอบและผลการทดสอบ

3.1 รายการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ขี้เถ้าลอยแม่เมาะเติมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตโดยมีตัวแปรดังนี้

1. ที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดคงที่เท่ากับ 0.5 ปริมาณซีเมนต์เป็นตัวแปรมีค่า 250, 300 และ 350 กก./ม.^{3}

2. ที่ปริมาณซีเมนต์คงที่เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเป็นตัวแปรมีค่า 0.4, 0.5 และ 0.6

โดยในแต่ละส่วนผสมจะมีปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมเพิ่มเป็นตัวแปรมีค่า 0, 15, 30, 45 และ 60 % โดยน้ำหนัก ตารางที่ 3.1 จะแสดงส่วนผสมทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งทุกส่วนผสมจะทำการทดสอบค่ายุบตัว ค่าการไหล ค่าการอัดแน่น ปริมาณฟองอากาศ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ส่วนตัวเลขในวงเล็บแสดงส่วนผสมที่จะทำการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว และระยะเวลาก่อตัวเพิ่มเติม

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ก. หิน

หินที่ใช้ในงานวิจัยเป็นหินปูนที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เป็นหินขนาดเบอร์ 2 ซึ่งต้องนำมาผสมรวมกับหินเบอร์ 1 บางส่วนเพื่อให้ได้ขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 และมีค่าโมดูลีสความละเอียด 7.22 ก่อนนำมาใช้ต้องล้างน้ำให้สะอาด และทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศก่อนมาผสมคอนกรีต และปรับแก้ปริมาณน้ำ

ข. ทราย

ทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นทรายธรรมชาติ เป็นทรายแม่น้ำที่ใช้กับงานคอนกรีตทั่วไป มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และมีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.61 ก่อนการนำมาใช้ต้องนำไปอบหาปริมาณความชื้นเพื่อนำมาปรับแก้ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต

ค. ซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตขึ้นโดยมีคุณสมบัติตามกำหนดมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-2514/2517 ประเภทหนึ่ง และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C 150-71 Type 1 เป็นปูนซีเมนต์ตราช้างของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด

ง. ขี้เถ้าลอย

ขี้เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นขี้เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินลิกไนต์ ที่ อ.แม่เมาะ จ. ลำปาง มีลักษณะเป็นผงละเอียด ไม่จับตัวเป็นก้อน ฟุ้งกระจายได้ง่าย มีสีปูนเทา สีสม่ำเสมอ ความถ่วงจำเพาะ 2.55 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา 4.7-6.3% ความละเอียด 2550-3550 ซม^2/กรัม เก็บไว้ในภาชนะปิดฝามิดชิด ป้องกันความชื้นจากบรรยากาศ

3.3 <u>การทดสอบ</u>

1. การทดสอบการยุบตัว (slump test) ทำการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C 143 เครื่องมือในการทดสอบประกอบด้วยกรวยตัดสูง 305 มม. ตอนบนเส้นผ่าศูนย์กลาง 102 มม. ตอนล่าง 203 มม. และเหล็กกระทุ้ง ปลายกลมมน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. การทดสอบทำโดยบรรจุคอนกรีตสดลงในแบบแบ่งเป็น 3 ชั้นๆละประมาณเท่ากันโดยปริมาตร แต่ละชั้นกระทุ่งด้วยเหล็กกระทุ้ง 25 ครั้ง เสร็จแล้วใช้เหล็กกระทุ้งปาดหน้าคอนกรีตให้ได้ระดับกับขอบกรวยและค่อยๆยกแบบขึ้นในแนวดิ่ง วัดการยุบตัวของคอนกรีตเทียบกับขอบปากกรวย

2. การทดสอบการไหล (flow test) การทดสอบกระทำโดยการวัดการกระจายของคอนกรีตภายใต้การตกกระทบ โดยใส่คอนกรีตในแบบหล่อรูปกรวยคว่ำสูง 127 มม. ตอน

บนมีเส้นผ่าสูนย์กลางภายใน 171 มม. ตอนล่างมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 254 มม. คอนกรีตจะแบ่งเป็น 2 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. เป็นจำนวน 25 ครั้งต่อชั้น แบบหล่อตั้งอยู่กลางแท่นเป็นรูปจานแผ่นเรียบทำด้วยโลหะ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 762 มม. แบบหล่อจะถูกยกขึ้นและลง เป็นระยะความสูง 12.7 มม. เป็นจำนวน 15 ครั้งใน 15 วินาที ทำให้คอนกรีตสดแผ่กระจายออกไปรอบด้าน วัดหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางของคอนกรีตที่กระจายออกไปนี้ ค่าการไหลหรือการกระจายตัวของคอนกรีต คำนวณได้จาก

$$\text{ค่าการไหล (\%)} = \left(\frac{D-Do}{Do}\right) \times 100 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.1)$$

ในเมื่อ D เป็นค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางคอนกรีตที่กระจายออกหลังการเขย่า, ซม.

Do เส้นผ่าศูนย์กลางเดิมของคอนกรีตที่ฐานก่อนการเขย่า จะมีค่าประมาณ 25 ซม.

3. การทดสอบการอัดแน่น (compacting factor test) ทำการทดสอบการอัดแน่นของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน BS 1881 : PART2 : 1970 วิธีนี้วัดสัดส่วนการอัดแน่นจากน้ำหนักของคอนกรีตในแบบหล่อที่ได้จากการอัดแน่นโดยเครื่องทดสอบการอัดแน่นต่อน้ำหนักของคอนกรีตในแบบหล่อที่ได้จากการอัดแน่น โดยการกระทุ้งให้แน่น การทดสอบการอัดแน่นโดยเครื่องทดสอบกระทำได้โดยบรรจุคอนกรีตในกรวยข้างบนเสร็จแล้วเป็นประตูปล่อยคอนกรีตให้ตกลงในกรวยล่าง แล้วเปิดประตูล่างปล่อยให้คอนกรีตหล่นด้วยตัวเองลงแบบหล่อ หากคอนกรีตที่ตกลงมาให้เสมอกับปากของแบบหล่อ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ส่วนการอัดแน่นโดยการกระทุ้งให้แน่น ทำได้โดยบรรจุคอนกรีตลงในแบบหล่อทีละชั้น 4 ชั้นเท่าๆกันโดยปริมาตร แต่ละชั้นกระทุ้งหรือเขย่าให้แน่น

4. การทดสอบการสูญเสียค่ายุบตัว (slump loss) ทำการทดสอบการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตสดด้วยการดัดแปลงวิธีการของ Robert W.Previte (42) การทดสอบนี้จะใช้คอนกรีตประมาณ 0.02 ม.^{3} การทดสอบค่ายุบตัวจะกระทำตามมาตรฐาน ASTM C143 จะทำการทดสอบค่ายุบตัวทุกๆ 10 นาทีจนกระทั่งครบ 90 นาที อนึ่งคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้จะถูกนำกลับเข้าไปคลุกเคล้าในโม่อีก การแสดงผลการสูญเสียค่ายุบตัวจะแสดงผลในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ทดสอบกับค่ายุบตัวของคอนกรีตสดที่เวลาต่างๆ กัน

5. การทดสอบหาปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตสด (air content of fresh

concrete) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C231 โดยการอัดความดันลงในภาชนะปิดดันปริมาตรฟองอากาศแล้วอ่านปริมาตรที่หายไป การทดสอบกระทำโดยบรรจุคอนกรีตสดลงในภาชนะสำหรับทดสอบทีละชั้น 3 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งให้แน่นด้วยเหล็กกระทุ้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. ชั้นละ 25 ครั้งเสร็จแล้วปาดให้เรียบ ปิดภาชนะให้แน่นแล้วเติมน้ำลงในเครื่องทดสอบแล้วปิดวาล์ว อ่านค่าเริ่มต้น อัดความดันภายในภาชนะเพิ่มขึ้น 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้วแล้วอ่านค่าปริมาตรที่หายไป ค่าปริมาณฟองอากาศจะหาได้จากผลต่างระหว่างค่าปริมาตรที่หายไป และค่าเริ่มต้นแล้วนำมาปรับแก้ปริมาณฟองอากาศเนื่องจากความพรุนและการดูดซับของมวลรวม

6. การทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตสด (setting time) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403 กระทำโดยการผสมคอนกรีตจนเข้ากันดีแล้ว นำคอนกรีตที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นำคอนกรีตส่วนที่ผ่านตะแกรงไปบรรจุลงในแบบหล่อสี่เหลี่ยมขนาด 150 x 150 x 150 มม. ทำการบรรจุคอนกรีต 2 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งปลายมนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. ชั้นละ 25 ครั้ง แล้วทดสอบความต้านทานการจมทุกๆ 15 นาที บันทึกเวลาที่ทดสอบและค่าความต้านทานการจมนำไปสร้างกราฟระหว่างเวลาและความต้านทานการจม การก่อตัวขั้นต้นของคอนกรีตจะมีความต้านทานการจม 35 กก./ซม.^{2} ส่วนการก่อตัวระยะปลายจะมีความต้านทานการจม 276 กก./ซม.^{2}

7. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (compressive strength) ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยรูปทรงกระบอกมาตรฐานเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม. การหล่อแท่งทดสอบทำได้โดยใช้แบบหล่อที่ทำจากเหล็กโดยบรรจุคอนกรีตเป็น 3 ชั้นๆละเท่าๆกัน แต่ละชั้นทำให้แน่นด้วยการกระทุ้งให้แน่นด้วยโลหะปลายมน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. จำนวนชั้นละ 25 ครั้ง การบ่มคอนกรีตจะทำการแช่ในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C684 ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จะนำไปหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยเครื่อง AMLER ขนาด 100 ตัน

3.4 ผลการทดสอบ

3.4.1 ค่ายุบตัว

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 จะพบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมในส่วนผสม จากรูปที่ 3.3 เมื่อให้ปริมาณซีเมนต์คงที่

อัตราการเพิ่มค่ายุบตัวของคอนกรีตสดจะมากที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.5 ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.4 และ 0.6 อัตรการเพิ่มค่ายุบตัวจะน้อย แสดงให้เห็นว่าการใช้ขี้เถ้าลอยในการปรับปรุงค่ายุบตัวเหมาะสำหรับคอนกรีตที่มีความข้นเหลวไม่มากหรือน้อยจนเกินไป และจากรูปที่ 3.4 เมื่อให้อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดคงที่ อัตราการเพิ่มค่ายุบตัวจะมากที่ปริมาณซีเมนต์ 250 และ 300 กก./ม.^{3} และที่ปริมาณซีเมนต์ 350 กก./ม.^{3} อัตราการเพิ่มค่าการยุบตัวจะน้อย ดังนั้นส่วนผสมคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำ การเติมขี้เถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงค่ายุบตัวได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์สูง

3.4.2 ค่าการไหล

จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 จะพบว่าแนวโน้มโดยทั่วไป ค่าการไหลของคอนกรีตสดจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมในส่วนผสม จากรูปที่ 3.5 เมื่อให้ปริมาณซีเมนต์คงที่ การเพิ่มค่าการไหลจะมากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.5 ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.4 และ 0.6 ค่าการไหลจะเพิ่มมากขึ้นเป็นสัดส่วนตามปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมแต่ทว่าอัตราการเพิ่มการไหลจะน้อยกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.5 และจากรูปที่ 3.6 เมื่อให้อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดคงที่ ที่ปริมาณซีเมนต์ 250, 300 และ 350 กก./ม.^{3} การเพิ่มค่าการไหลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติม

3.4.3 ค่าการอัดแน่น

แนวโน้มโดยทั่วไปแสดงให้เห็นว่าการเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตช่วยทำให้การอัดแน่นของคอนกรีตสดเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่ 3.7 เมื่อให้ปริมาณซีเมนต์คงที่ ที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.6 จะพบว่าการเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมจะช่วยเพิ่มค่าการอัดแน่นน้อยมาก ซึ่งจะแตกต่างจากที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.4 หรือ 0.5 จากรูปที่ 3.8 เมื่อให้อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดคงที่ ที่ปริมาณซีเมนต์ 350 กก./ม.^{3} จะพบว่าการเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมจะช่วยเพิ่มค่าการอัดแน่นน้อยมาก ซึ่งจะแตกต่างจากที่ปริมาณซีเมนต์ 300 หรือ 250 กก./ม.^{3}

3.4.4 ปริมาณฟองอากาศ

จากรูปที่ 3.9 และ 3.10 แนวโน้มโดยทั่วไปจะพบว่าการเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตจะทำให้ปริมาณฟองอากาศลดลง 0.1% โดยปริมาตรทุกๆการเติมขี้เถ้าลอยทีละ 15% โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 3.9 เมื่อปริมาณซีเมนต์คงที่ ที่อัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดเท่ากับ 0.6 การเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตดูเหมือนว่าจะไม่ทำให้ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตสดเปลี่ยนไป

3.4.5 การสูญเสียค่ายุบตัว

การเติมขี้เถ้าลอยในคอนกรีตจะทำให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตสดเพิ่มมากขึ้น การสูญเสียค่ายุบตัวจะน้อยลง ดังรูปที่ 3.11, 3.12 และ 3.13 เช่น จากรูปที่ 3.13 เมื่ออัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดคงที่เท่ากับ 0.5 และปริมาณซีเมนต์คงที่ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวของคอนกรีตธรรมดาจะเท่ากับ 2.1 ซม. ภายหลังการเติมน้ำในส่วนผสม 2 นาที แต่เมื่อเติมขี้เถ้าลอยเพิ่มในปริมาณ 15% โดยน้ำหนักแล้ว คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีค่าการยุบตัว 2.2 ซม. ภายหลังการเติมน้ำในส่วนผสม 32 นาที และเมื่อเติมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก จะพบว่าคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีการยุบตัว 1.7 ซม. ภายหลังการเติมน้ำในส่วนผสม 62 นาที และเมื่อเติมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 45% โดยน้ำหนัก คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีค่าการยุบตัว 2.1 ซม.ภายหลังการเติมน้ำในส่วนผสม 82 นาที และเมื่อเติมขี้เถ้าลอยในปริมาณ 60% โดยน้ำหนักแล้วคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีการยุบตัว 6 ซม. ภายหลังการเติมน้ำเป็นเวลา 92 นาที

3.4.6 ระยะเวลาก่อตัว

การเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตจะมีผลน้อยมากต่อระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต จากรูปที่ 3.14 จะพบว่าระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติม และจากรูปที่ 3.15 และ 3.16 จะพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียดสูงขึ้น การหน่วงการก่อตัวจะเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียด ส่วนปริมาณซีเมนต์เริ่มต้นจะไม่มีผลต่อการหน่วงการก่อตัวทั้งช่วงต้นและช่วงปลายดังรูปที่ 3.17 และ 3.18

3.4.7 กำลังอัด

แนวโน้มโดยทั่วไปจะเห็นได้ว่าการเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตจะทำให้

กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันลดลงตามปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติม ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และ 3.20 การลดลงของกำลังอัดจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณขี้เถ้าลอย พบว่ากำลังอัดจะลดลง 10% ทุกๆการเติมขี้เถ้าลอยทีละ 10% โดยน้ำหนัก