

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการอภิปราย

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 ความถี่จำเพาะของสารเชื่อมประสาน

ผลการทดสอบความถี่จำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์แกลบ และ ซีเมนต์ลอย เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง และ ได้แสดงไว้ในตารางผนวก ก., ข. และ ค. ตามลำดับ ซึ่งความถี่จำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แกลบ และซีเมนต์ลอยมีค่าเท่ากับ 3.13, 2.10 และ 2.68 ตามลำดับ ความถี่จำเพาะของสารซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบทางเคมีในส่วนผสมออกไซด์ของธาตุที่มีความหนาแน่นสูงได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก อลูมิเนียม แมกนีเซียม และ คัลเซียม ส่วนออกไซด์ของธาตุที่มีความหนาแน่นต่ำได้แก่ออกไซด์ของ ซิลิกอน ซัลเฟอร์ โซเดียม และ โพแทสเซียม (Aylward และ Finlay, อ้างถึง ใน ปริญา และ อินทรชัย, 2528) ซีเมนต์แกลบมีออกไซด์ของซิลิกอนเป็นส่วนประกอบมีปริมาณสูงซึ่งมีความถี่จำเพาะต่ำ ส่วนปูนซีเมนต์และซีเมนต์ลอยมีออกไซด์ของคัลเซียม อลูมิเนียม และเหล็กในปริมาณสูง จึงมีความถี่จำเพาะสูงกว่าซีเมนต์แกลบ

4.1.2 ความถี่จำเพาะ การดูดซึ่ม และขนาดผลของมวลรวม

ผลการทดสอบความถี่จำเพาะ และ เบอร์เชนส์การดูดซึ่มของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด ได้แสดงไว้ในตารางผนวก ง. และ จ. ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง ความถี่จำเพาะของมวลรวมหยาบมีค่าเท่ากับ 2.72 ความถี่จำเพาะของมวลรวมละเอียดมีค่าเท่ากับ 2.54 เบอร์เชนส์การดูดซึ่มของมวลรวมหยาบมีค่าเท่ากับ 0.17

เบอร์ขึ้นด้วยการดูดัชนีของมวลรวมละเอียดมีค่าเท่ากับ 0.29 และผลการทดสอบขนาดละเอียดของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดแสดงไว้ในตารางผนวก ฉ. และ ข. และแสดง Grain Size Distribution Curve ในภาพที่ 4.1

4.1.3 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของซีเมนต์แกลบ

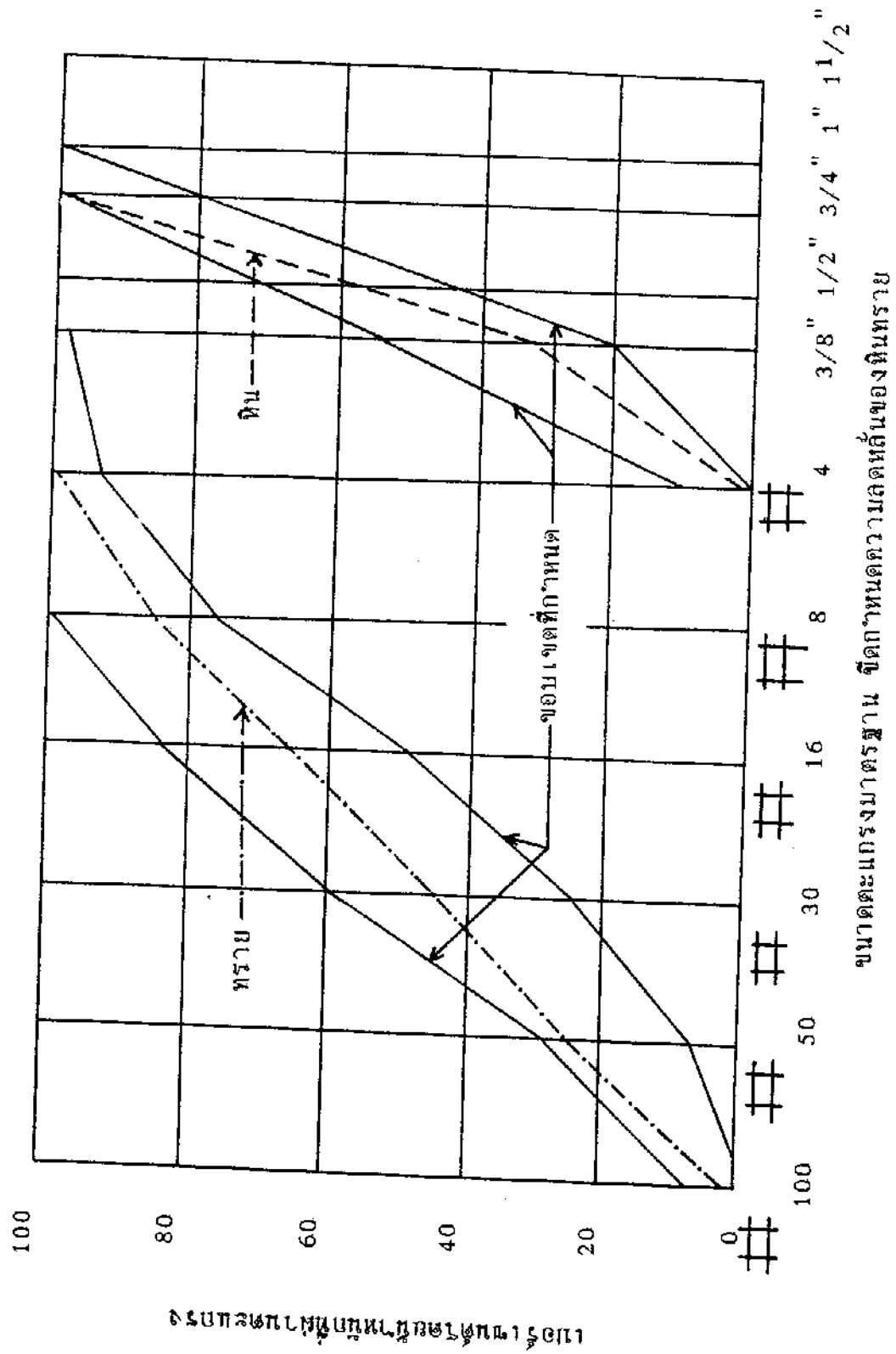
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของซีเมนต์แกลบมีค่าร้อยละ 49 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบจำนวน 2 ตัวอย่าง ทดสอบโดยการเผาซีเมนต์แกลบที่อุณหภูมิ 950 ± 50 °C จนได้น้ำหนักคงที่ ใช้ตัวอย่าง ซีเมนต์แกลบ 1 กรัม เผาครั้งแรกอย่างน้อย 15 นาที และครั้งต่อไปอย่างน้อยครั้งละ 5 นาที ตามมาตรฐาน ASTM C114 ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา แสดงให้เห็นถึงปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ ซึ่งมีอยู่มากในซีเมนต์แกลบค่า Sooriyankumaran และ Ismail (1979) และ Cook และ Suwanvitaya (1981) ได้แสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมที่มีคาร์บอนร้อยละ 15-20 จะไม่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต แต่ถ้ามากกว่าร้อยละ 20 จะทำให้กำลังลดลงได้

4.2 ผลการทดสอบการบดอัด

ได้ทำการทดสอบการบดอัดของ RCC ที่มีอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ : ซีเมนต์แกลบ : ซีเมนต์ลอยแม่เมาะ เท่ากับ 100:0:0, 80:20:0, 80:0:20, 60:40:0, 60:20:20 และ 60:0:40 รายละเอียดของผลการทดสอบได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

การทดสอบการบดอัดได้เลือกวิธี Modified Proctor ตามมาตรฐาน D1557 เนื่องจากวิธีนี้เหมาะสมกับ RCC ที่ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่มาก และมีปริมาณปูนซีเมนต์ค่อนข้างสูง (ACI Committee 207, 1983) ซึ่งมีคุณลักษณะตรงตามปฏิกิริยาส่วนผสมของ RCC ที่ใช้สำหรับการทดสอบครั้งนี้

ในการนำเสนอผลการทดสอบการบดอัด สามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและปริมาณน้ำได้ 3 แบบคือ



ภาพที่ 4.1 ขนาดตะแกรงมาตรฐาน และ มวลรวมละเอียด

1. ความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำที่ได้จากการอบแห้ง (ACI Committee 207, 1983; Noel, John และ David, 1988; John L., 1988 และ John R., 1988) เป็นวิธีที่นำไปใช้ในการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดิน เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของมวลดินที่มีความหนาแน่นสูงสุด ค่าความหนาแน่นแห้งจะคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่หาได้จากการอบแห้ง
 2. ความหนาแน่นเปียกกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสม (Rahimi, 1987 และ Kajorncheappanngam, 1990) วิธีนี้ใช้สำหรับการวัดความหนาแน่นของคอนกรีต โดยที่ความหนาแน่นเปียก (Wet Density) จะเป็นค่าที่วัดได้ ส่วนปริมาณน้ำเป็นปริมาณน้ำที่ใช้ผสม
 3. ความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสม (Teresa และ Vaughan, 1988) วิธีนี้จะแสดงความหนาแน่นในรูปของความหนาแน่นแห้ง โดยค่าความหนาแน่นแห้งจะคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่ใช้ผสม และปริมาณน้ำเป็นปริมาณน้ำที่ใช้ผสม
- ผลการทดสอบการบดอัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ ในภาพที่ 4.2 ก., ข. และ ค. ภาพที่ 4.2 ก. แสดงผลการทดสอบในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำที่ได้จากการอบแห้ง จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟทั้งหมดเป็นรูปประจักษ์กว่า โดยที่ส่วนผสมที่ 1 ด้านขวาของจุดสูงสุด จะมีความชันมากกว่าทางด้านซ้ายและเกือบจะเป็นเส้นตรง เส้นกราฟของส่วนผสมที่ 2 เส้นกราฟทางซ้ายของจุดสูงสุดมีความชันมากกว่าทางขวา เส้นกราฟของส่วนผสมที่ 3 เส้นกราฟทางด้านซ้ายและขวาของจุดสูงสุดสมมาตรกัน เส้นกราฟของส่วนผสมที่ 4 เส้นกราฟทางด้านขวามีความชันมากกว่าทางด้านซ้าย เส้นกราฟของส่วนผสมที่ 5 เส้นกราฟของด้านซ้ายและขวาของจุดสูงสุดสมมาตรกัน มีความชันไม่มากนัก และเส้นกราฟของส่วนผสมที่ 6 เส้นกราฟทางด้านซ้ายและขวาของจุดสูงสุดมีความชันมาก จึงทำให้กราฟมีลักษณะคล้ายหัวลูกศร ลักษณะเส้นกราฟของทั้ง 6 ส่วนผสมมีลักษณะที่แตกต่างกันมาก ทั้งที่ควรจะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เพราะมวลรวมที่ใช้มีขนาดใกล้เคียงกัน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการสูญเสียไอน้ำระหว่างการเตรียมตัวอย่าง

ภาพที่ 4.2 ข. ซึ่งแสดงผลการทดสอบในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเปียกกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสม เส้นกราฟของทั้ง 6 ส่วนผสมจะเป็นรูป

ระฆังคว่ำและค่อนข้างคล้ายกัน โดยที่ทางด้านซ้ายของค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม ลักษณะของกราฟจะชัน ส่วนทางด้านขวาของค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมลักษณะของกราฟจะมีความชันน้อยกว่าทางด้านซ้าย

ส่วนภาพที่ 4.2 ค. แสดงผลการทดสอบในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสม จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของทั้ง 6 ส่วนผสมจะเป็นรูประฆังคว่ำเช่นกัน แต่เส้นกราฟมีลักษณะกลับกันเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.2 ข. คือ ทางด้านขวาของค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม ลักษณะของกราฟจะชัน ส่วนทางด้านซ้ายของค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมลักษณะของกราฟจะชันน้อยกว่าทางด้านขวา เนื่องมาจากว่าในการคำนวณค่าความหนาแน่นแห้ง จะต้องคำนวณจากค่าความหนาแน่นเปียกหารด้วยค่าของ $(1 + \text{ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม})$ ดังนั้นเมื่อปริมาณน้ำยิ่งมากขึ้น ความหนาแน่นแห้งที่ได้ก็จะยิ่งลดลงมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นเปียกที่ปริมาณน้ำเดียวกัน

เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม เป็นปริมาณน้ำที่เริ่มต้นขณะบดอัดในขบวนการบดอัด ส่วนผสมจะสูญเสียน้ำเนื่องจากการดูดซับของมวลรวม ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ได้เพิ่มปริมาณน้ำที่จะสูญเสียเนื่องจากการดูดซับของมวลรวมเข้าไปด้วย ในรูปของเปอร์เซ็นต์การดูดซึมของมวลรวม นอกจากนี้ส่วนผสมจะสูญเสียน้ำเนื่องจากการระเหยของน้ำ และการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ (Teresa และ Vaughan, 1988) และการสูญเสียน้ำนี้ยังเกิดจากการกระทุ้งแน่นซึ่งก็ได้แก่ การกระแทกออกจากแบบหล่อและการรื้อตามรอยต่อของแบบหล่อ ดังนั้นปริมาณน้ำขณะเริ่มบดอัดจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับปริมาณน้ำที่เดิมเข้าไปและปริมาณน้ำเมื่อสิ้นสุดการบดอัดจะมีค่าน้อยลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการสูญเสียน้ำดังกล่าวข้างต้น จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าปริมาณการสูญเสียน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเริ่มแรก ส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำเริ่มต้นสูงจะสูญเสียน้ำขณะบดอัดมาก และส่วนผสมที่มีน้ำอยู่น้อยจะสูญเสียน้ำขณะบดอัดน้อย ส่วนผสมที่มีน้ำอยู่ 4, 5, 6, 7 และ 8 % โดยน้ำหนักของมวลรวมแห้งจะสูญเสียน้ำเฉลี่ย 0.4, 0.5, 1.0, 1.5 และ 1.9 % ตามลำดับ จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น Teresa และ Vaughan (1988) ได้แนะนำให้ใช้ความหนาแน่นแห้งที่คำนวณจากปริมาณน้ำที่ใช้ผสม เพราะจะให้ผลการทดสอบที่ได้ถูกต้องแม่นยำกว่า

และเนื่องจากผลการวิจัยเกี่ยวกับ RCC ส่วนมากนิยมใช้ค่าความหนาแน่นแห้งมากกว่าที่จะใช้ค่าความหนาแน่นเปียก ดังนั้นจึงสามารถชี้ภาพที่ 4.1ค. แสดงผลการทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของทั้ง 6 รูปมีลักษณะคล้ายกันและเป็นรูประฆังคว่ำ สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกเมื่อใช้ปริมาณน้ำที่ต่ำแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะโบเคสือบรอบ ๆ อนุภาคของวัสดุผสมมากขึ้นเรื่อย ๆ เป็นการช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ทำให้ระหว่างอนุภาคของวัสดุผสม สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นและจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะของโครงสร้างที่แน่นขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ความหนาแน่นจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ณ จุดนี้น้ำจะเริ่มค่อย ๆ เข้าไปแทนที่อนุภาคของวัสดุผสม เนื่องจากความหนาแน่นของน้ำมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของวัสดุผสม ดังนั้นเส้นกราฟความหนาแน่นจึงเริ่มตกลง (Robert และ William, 1981) ค่าปริมาณน้ำ ณ จุดที่ RCC มีความหนาแน่นสูงสุดหรือค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ค่าดังกล่าวของส่วนผสมทั้ง 6 มีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าระหว่าง 5.7 - 6.0 % ของมวลรวมแห้ง สาเหตุซึ่งค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมใกล้เคียงกัน เนื่องจากใช้มวลรวมชนิดเดียวกัน US. Army Corps of Engineers ได้รายงานไว้ว่า RCC ที่ใช้มวลรวมชนิดเดียวกัน และปริมาณเท่ากันจะมีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมใกล้เคียงกัน ถึงแม้จะใช้ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่แตกต่างกันมาก (Noel, John และ David, 1988) นอกจากนี้ Noel, John และ David (1988) ได้รายงานไว้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุเชื่อมประสานจำนวนหนึ่งในส่วนผสม ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 1 ปอนด์/ลบ.ฟุต ในขณะที่ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมลดลงน้อยมากเพียง 0.2 % เท่านั้น

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.2 ค. พบว่าส่วนผสมที่ 1-6 มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2390 กก./ลบ.ม., 2380 กก./ลบ.ม., 2450 กก./ลบ.ม., 2330 กก./ลบ.ม., 2400 กก./ลบ.ม. และ 2460 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่ 3 กับส่วนผสมที่ 6 มีความหนาแน่นแห้งสูงมากเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ 1 สาเหตุเนื่องมาจากทั้ง 2 ส่วนผสมมีซีเมนต์ล้อยผสมอยู่ รูปร่างของซีเมนต์ล้อยเป็นทรงกลม การผสมซีเมนต์ล้อยมีผลทำให้ RCC มีความสามารถ

ในการทำงานได้ และความสามารถในการบดอัดดียิ่งขึ้น (Hague และ Ward, 1986) จึงทำให้ส่วนผสมที่ 3 กับส่วนผสมที่ 6 มีความหนาแน่นสูง ส่วนผสมที่ 6 จะมีความหนาแน่นสูงสุดและมากกว่าส่วนผสมที่ 3 เพราะว่าส่วนผสมที่ 6 มีซีเมนต์ลดยผสมอยู่มากกว่าส่วนผสมที่ 3 ส่วนผสมที่ 5 มีความหนาแน่นแห้งมากกว่า เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ 1 แต่ไม่มากนัก ก็เนื่องมาจากส่วนผสมมีทั้งซีเมนต์ แกลบและซีเมนต์ลย ซีเมนต์ลยทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นแห้งสูงขึ้น แต่ซีเมนต์แกลบทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นต่ำลง ส่วนผสมที่ 2 กับ ส่วนผสมที่ 4 มีความหนาแน่นแห้งต่ำเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ 1 ก็เนื่องมาจากส่วนผสมทั้ง 2 ชนิดมีซีเมนต์แกลบเป็นส่วนผสมด้วย ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์แกลบน้อยกว่า ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ลยและปูนซีเมนต์ (ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์แกลบเท่ากับ 2.10 ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ลยเท่ากับ 2.68 และส่วนผสมของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.13) จึงทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง

การศึกษาผลงานวิจัยในอดีตพบว่า การทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของ RCC โดยวิธี Modified Proctor ตามมาตรฐาน ASTM D1557 นั้น ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ต่ำสุดเท่ากับ 4.6 % (Kenneth และ Leslie, 1988) และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สูงสุดเท่ากับ 12.2 % (Joshi และ Natt, 1983) สำหรับการทดลองครั้งนี้พบว่า ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของทั้ง 3 ส่วนผสมมีค่าประมาณเท่ากับ 6% ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงค่าปริมาณน้ำต่ำสุดและสูงสุด แต่จะค่อนข้างจะมาจากค่าปริมาณน้ำเหมาะสมที่ต่ำสุด แต่อย่างไรก็ตาม การนำผลการทดลองต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับกันจะต้องคำนึงถึงความแตกต่างของการทดลองที่แตกต่างกัน โดยที่ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยวิธีการทดสอบการบดอัดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ปฏิกริยาไฮเดรชัน การระเหยและการดูดซึมน้ำ ปริมาณวัสดุป้อนโรลลัน สารผสมเพิ่มและการดูดซึมน้ำ (ACI Committee 207, 1983)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการบดอัด RCC โดยนำเสนอในรูปความสัมพันธ์
ของความหนาแน่นกับปริมาณน้ำ

ส่วนผสมที่	C:RHA:FA	ปริมาณน้ำ ที่ใช้ผสม (%)	ปริมาณน้ำ จากการ อบแห้ง (%)	ความหนาแน่นเปียก (ค่าเฉลี่ย) (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นแห้ง จากปริมาณน้ำ ที่อบแห้ง (ค่าเฉลี่ย) (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นแห้ง จากปริมาณน้ำ ที่ใช้ผสม (ค่าเฉลี่ย) (กก./ลบ.ม.)
1	100:0:0	4	3.80	2,400	2,312	2,308
		5	4.58	2,494	2,385	2,375
		6	5.21	2,540	2,414	2,396
		7	5.53	2,473	2,343	2,311
		8	5.70	2,425	2,290	2,245
2	80:20:0	4	3.89	2,350	2,262	2,260
		5	4.72	2,450	2,340	2,333
		6	5.16	2,525	2,401	2,382
		7	5.37	2,505	2,377	2,341
		8	6.44	2,466	2,317	2,283
3	80:0:20	4	3.52	2,450	2,367	2,356
		5	4.52	2,568	2,457	2,446
		6	4.76	2,600	2,482	2,453
		7	5.53	2,558	2,424	2,391
		8	6.18	2,474	2,330	2,291
4	60:40:0	4	3.58	2,360	2,278	2,269
		5	4.38	2,440	2,338	2,324
		6	5.24	2,475	2,352	2,335
		7	5.70	2,450	2,318	2,290
		8	5.85	2,433	2,298	2,253

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการบดอัด RCC โดยน้ำหนักในรูปความ

สัมพันธ์ของความหนาแน่นกับปริมาณน้ำ (ต่อ)

ส่วนผสมที่	C:RHA:FA	ปริมาณน้ำ ที่ใช้ผสม (%)	ปริมาณน้ำ จากการ อบแห้ง (%)	ความหนาแน่นเปียก ค่าเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นแห้ง จากปริมาณน้ำ ที่อบแห้ง (ค่าเฉลี่ย) (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นแห้ง จากปริมาณน้ำ ที่ใช้ผสม (ค่าเฉลี่ย) (กก./ลบ.ม.)
5	60:20:20	4	3.52	2,435	2,352	2,341
		5	4.45	2,514	2,407	2,394
		6	5.07	2,549	2,426	2,405
		7	6.01	2,525	2,382	2,306
		8	6.52	2,480	2,328	2,296
6	60:0:40	4	3.98	2,475	2,380	2,380
		5	4.56	2,574	2,462	2,451
		6	4.73	2,610	2,492	2,462
		7	5.01	2,585	2,462	2,416
		8	5.75	2,517	2,380	2,311

หมายเหตุ 1) C:RHA:FA = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ฐี่เถ้ากลบ : ฐี่เถ้าลอย

2) ปริมาณน้ำจากการอบแห้ง=ปริมาณน้ำที่ได้จากการนำเอา RCC

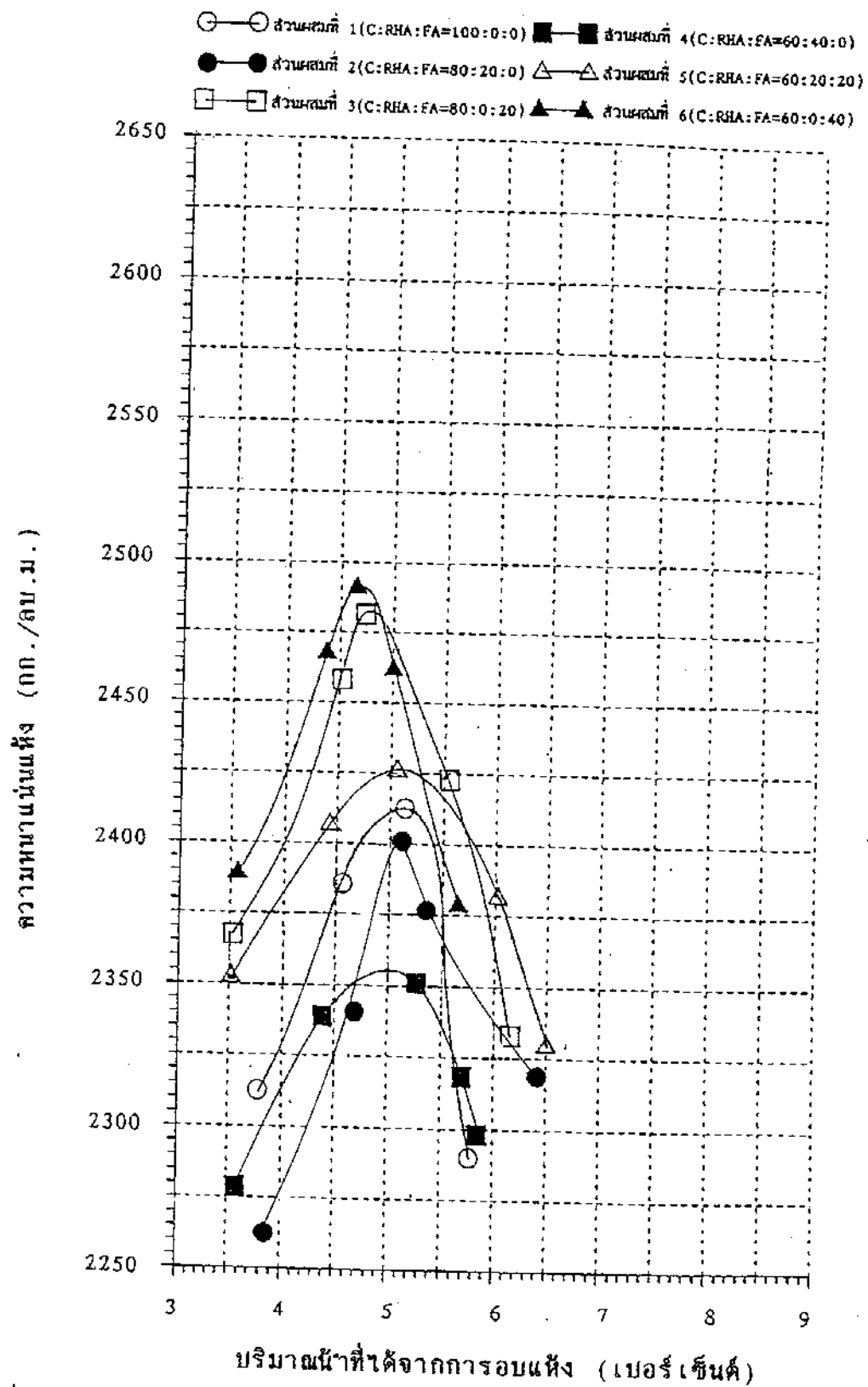
ไปอบแห้งเช่นเดียวกับวิธีการหาปริมาณน้ำในการทดสอบการบดอัดดิน

3) ความหนาแน่นเปียก = $\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างในสภาพเปียก}}{\text{ปริมาตรของแบบหล่อ}}$

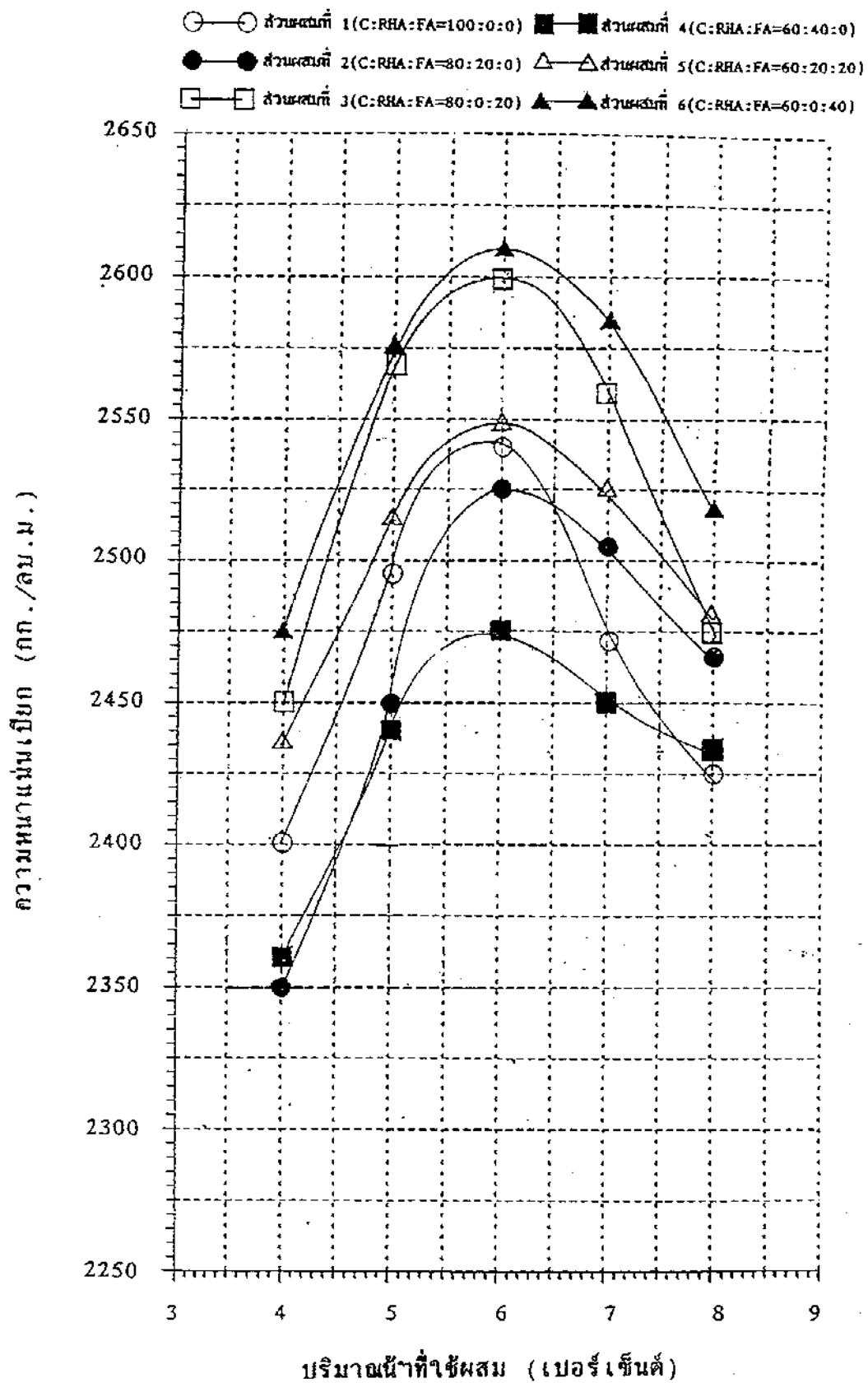
ปริมาตรของแบบหล่อ

4) ความหนาแน่นแห้งจากปริมาณน้ำที่อบแห้ง = $\frac{\text{ความหนาแน่นเปียก}}{(1+\text{ปริมาณน้ำที่ได้จากการอบแห้ง})}$

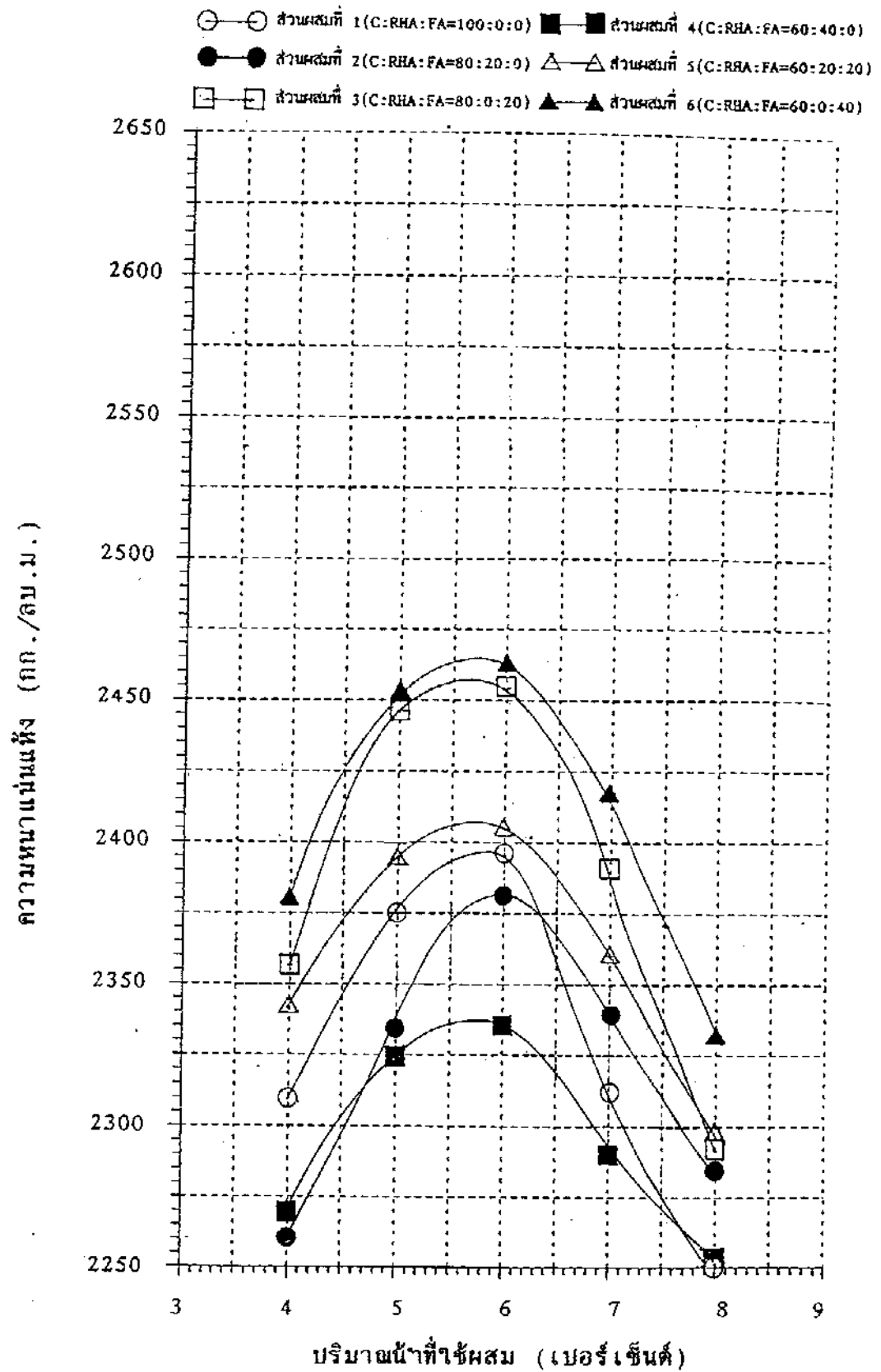
5) ความหนาแน่นแห้งจากปริมาณน้ำที่ใช้ผสม = $\frac{\text{ความหนาแน่นเปียก}}{(1+\text{ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม})}$



ภาพที่ 4.2ก. ผลการทดสอบการบดอัด RCC โดยนำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ของความหนาน้ำหนักกับปริมาณน้ำที่ได้จากการอบแห้ง



ภาพที่ 4.2ข. ผลการทดสอบการบดอัด RCC โดยนำเสนอในรูปความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเปียกกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสม



ภาพที่ 4.2ก. ผลการทดสอบการบดอัด RCC โดยนำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ของความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำที่ใช้ผสม

4.3 ผลของปริมาณซีเมนต์แกลบและซีเมนต์ลอยที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งทดสอบ RCC ที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบและซีเมนต์ลอยทั้ง 6 ส่วนผสมคือ 100:0:0, 80:0:20, 80:20:0, 60:40:0, 60:20:20 และ 60:0:40 ที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมคือ 6 % และที่ปริมาณน้ำต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมคือ 4 , 5 และ 7 % ผลการทดลองได้แสดงไว้ในตารางภาคผนวก ญ. ส่วนตารางที่ 4.2 ภาพที่ 4.3ก. และ ข. แสดงตัวอย่างการวิบัติของแท่งตัวอย่าง และภาพที่ 4.4ก., ข. และ ค. เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ

จากผลการทดลองในตารางภาคผนวก ญ. ตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.4 ก., ข. และ ค. จากการทดสอบที่อายุการบ่ม 7 วัน กำลังอัดของ RCC ที่มีซีเมนต์ลอยเป็นส่วนผสมส่วน ๆ คือ 80:0:20, 60:0:40 จะมีกำลังรับแรงอัดจะต่ำกว่าส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ส่วน ๆ คือ 100:0:0 ไม่มาก แต่เมื่อส่วนผสมมีซีเมนต์แกลบเป็นส่วนผสมส่วน ๆ คืออัตราส่วนผสม 80:20:0, 60:40:0 จะทำให้กำลังรับแรงอัดของ RCC ต่ำลง การที่ส่วนผสมที่มีซีเมนต์แกลบผสมอยู่ส่วน มีกำลังรับแรงอัดต่ำ เนื่องมาจากซีเมนต์แกลบมีส่วนผสมของคาร์บอนสูง จากการทดสอบหาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ พบว่ามีคาร์บอนสูงถึง 49 % ซึ่งปริมาณคาร์บอนที่เกิน 20 % จะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ผสม และทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงได้ (Sooriyankumaran และ Ismail, 1979; Cook และ Suwanvitaya , 1981) สำหรับส่วนผสมที่มีซีเมนต์แกลบและซีเมนต์ลอยเป็นส่วนผสมคือ อัตราส่วน 60:20:20 กำลังรับแรงอัดของ RCC จะดีขึ้นจากส่วนผสมที่มีซีเมนต์แกลบ 40 % แต่ก็ยังคงต่ำกว่าส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ส่วน ที่อายุการบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงอัดของ RCC จะเพิ่มขึ้น RCC ที่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมส่วนจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า RCC ที่มีซีเมนต์แกลบ และซีเมนต์ลอยเป็นส่วนผสม กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน โดยที่ RCC ที่มีซีเมนต์ลอยเป็นส่วนผสมส่วนอัตรา การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นน้อย เนื่องจากซีเมนต์ลอยจะทำปฏิกิริยาได้ช้าในช่วงแรก ส่วน RCC ที่มีซีเมนต์แกลบเป็นส่วนผสมส่วน อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากซีเมนต์แกลบมีความละเอียดและว่อง

วามในการทาบฏิกิริยามากกว่าซีไฉ่ลวย (Yeoh et al, 1979) ทำให้กำลังรับแรงอัดระยะแรก ๆ เพิ่มขึ้นสูง ส่วน RCC ที่มีทั้งซีไฉ่แกลบและซีไฉ่ลวยเป็นส่วนผสมกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นปานกลาง

ที่อายุบ่ม 90 วัน กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ 1 ที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ล้วนคือ 100:0:0 จะมีค่าสูงสุด ซึ่งจะมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันไม่มาก สำหรับส่วนผสมที่มีซีไฉ่ลวยล้วนเป็นส่วนผสมอยู่ คือ 80:0:20 และ 60:0:40 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ 1 ที่มีปูนซีเมนต์ล้วน กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาบอชโรลันของซีไฉ่ลวย สำหรับส่วนผสมที่มีซีไฉ่แกลบเป็นส่วนผสมคือส่วนผสม 80:20:0 และ 60:40:0 กำลังรับแรงอัดจะต่ำกว่า กำลังรับแรงอัดจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าซีไฉ่แกลบไม่ค่อยมีผลต่อการพัฒนากำลังระยะยาว สำหรับส่วนผสมที่มีทั้งซีไฉ่แกลบและซีไฉ่ลวยเป็นส่วนผสม คือ ส่วนผสม 60:20:20 กำลังรับแรงอัดจะมีค่าปานกลาง การเพิ่มของกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ RCC นี้ แสดงให้เห็นว่าซีไฉ่แกลบตามีปริมาณคาร์บอนอยู่สูงทำให้กำลังรับแรงอัดของ RCC ลดลง แต่เนื่องจากซีไฉ่แกลบมีความละเอียดสูง และมีความว่องไวในการทาบฏิกิริยา ทำให้กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกสูง เมื่อซีไฉ่แกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เหมาะสมประมาณ 20 % จะทำให้กำลังรับแรงอัดของ RCC นี้ระยะต้นและระยะปลายอยู่ในเกณฑ์ดี ถ้าส่วนผสมมีปริมาณซีไฉ่แกลบมากประมาณ 40 % จะทำให้กำลังรับแรงอัดของ RCC ลดลงมาก ส่วนซีไฉ่ลวยจะทาบฏิกิริยาได้ช้าในช่วงแรก แต่จะสามารถทาบฏิกิริยาได้ดีในช่วงระยะยาว และจะทำให้กำลังรับแรงอัดในระยะปลายเพิ่มสูงขึ้น การผสมซีไฉ่แกลบและซีไฉ่ลวยเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดของ RCC ลดลง เมื่อเทียบกับ RCC ที่มีปูนซีเมนต์ล้วนเป็นส่วนผสม แต่ผลของปฏิกิริยาบอชโรลันจะทำให้กำลังรับแรงอัดของ RCC ที่อายุมากขึ้นที่มีซีไฉ่แกลบและซีไฉ่ลวยมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะคล้ายกับผลการทดสอบกำลังรับแรงของมอร์ต้าผสมซีไฉ่แกลบและซีไฉ่ลวย (ชุมพล, 2528)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ RCC (ค่าเฉลี่ย)

ส่วนผสมที่	C:RHA:FA	ปริมาณน้ำ (%)	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)		
			7 วัน	28 วัน	90 วัน
1	100:0:0	4	147	212	-
		5	167	256	261
		6	151	229	234
		7	112	190	198
2	80:20:0	4	113	174	-
		5	137	181	206
		6	120	168	179
		7	104	124	159
3	80:0:20	4	143	164	-
		5	165	205	226
		6	150	171	209
		7	109	135	178
4	60:40:0	4	85	103	-
		5	88	133	146
		6	83	110	123
		7	80	96	122
5	60:20:20	4	117	139	-
		5	157	180	220
		6	121	150	181
		7	97	129	161
6	60:0:40	4	118	213	-
		5	160	216	250
		6	148	181	221
		7	107	143	190

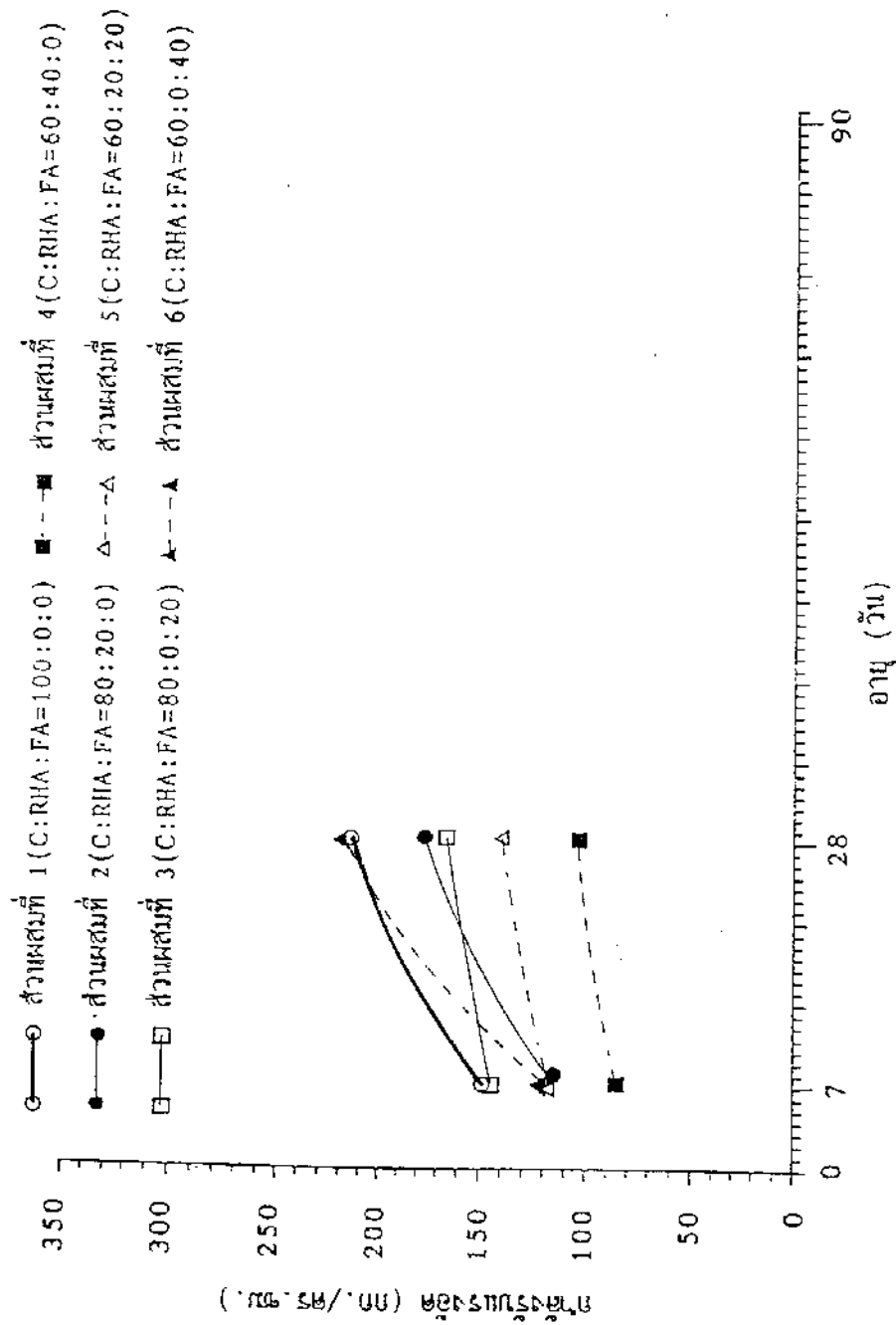
หมายเหตุ 1. C:RHA:FA = มูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์:ซีเถ้ากลบ:ซีเถ้าลอย



ภาพที่ 4.3ก. ตัวอย่างการวิบัติของ RCC

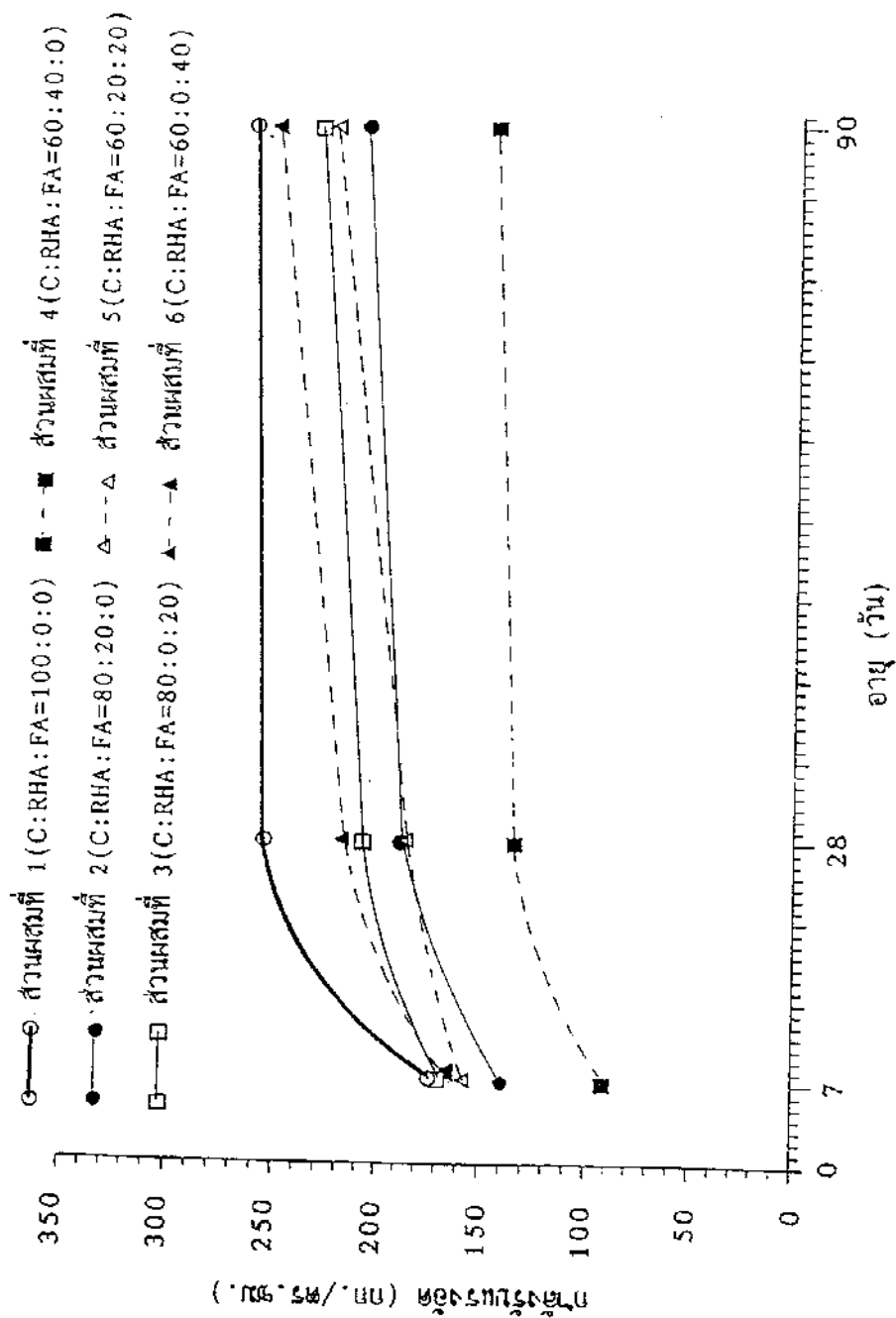


ภาพที่ 4.3ข. ตัวอย่างการวิบัติของ RCC



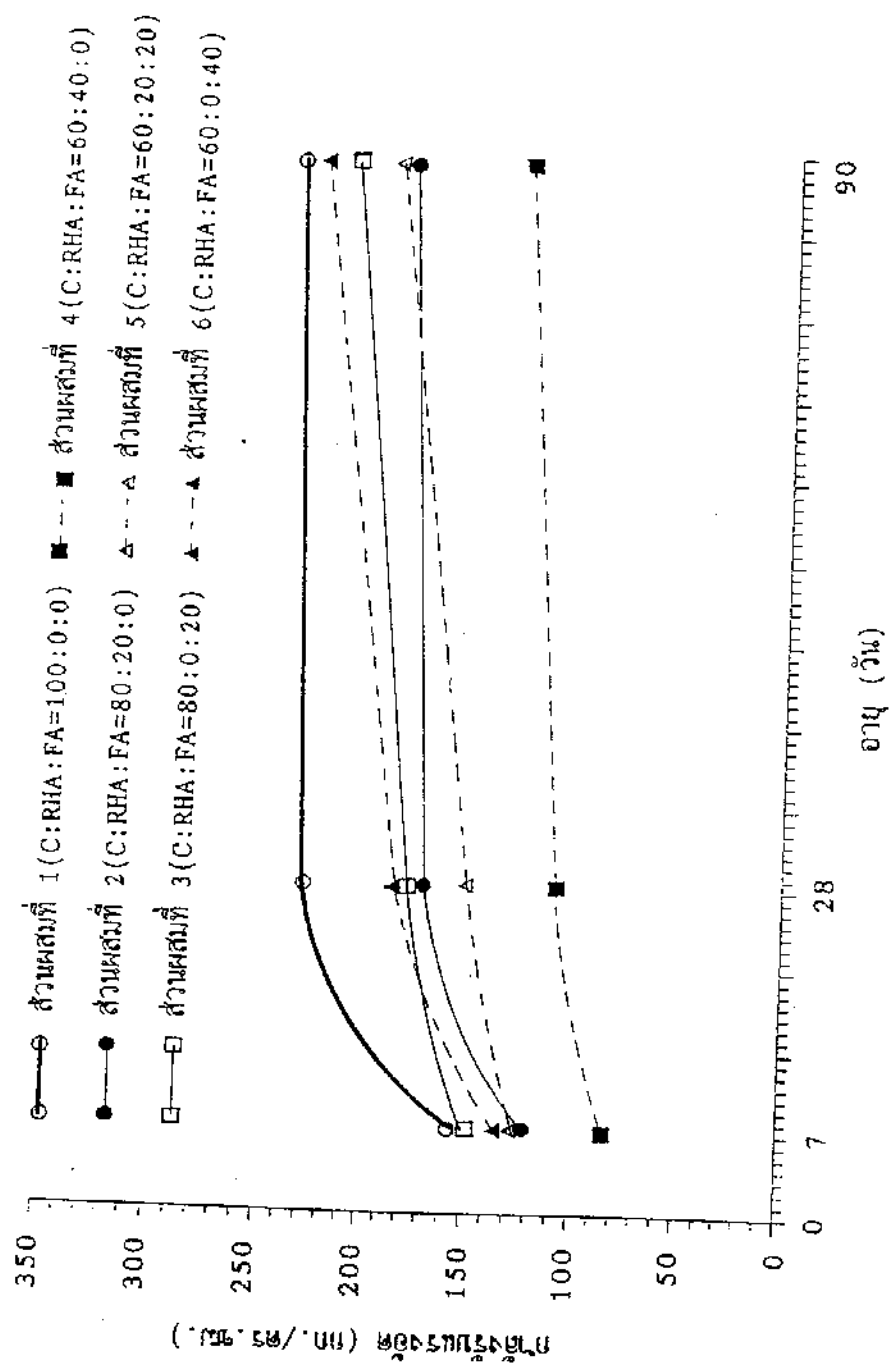
ภาพที่ 4.4ก. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ RCC โดยปริมาตรน้ำ

เท่ากับ 4 % ของมวลรวมแห้ง

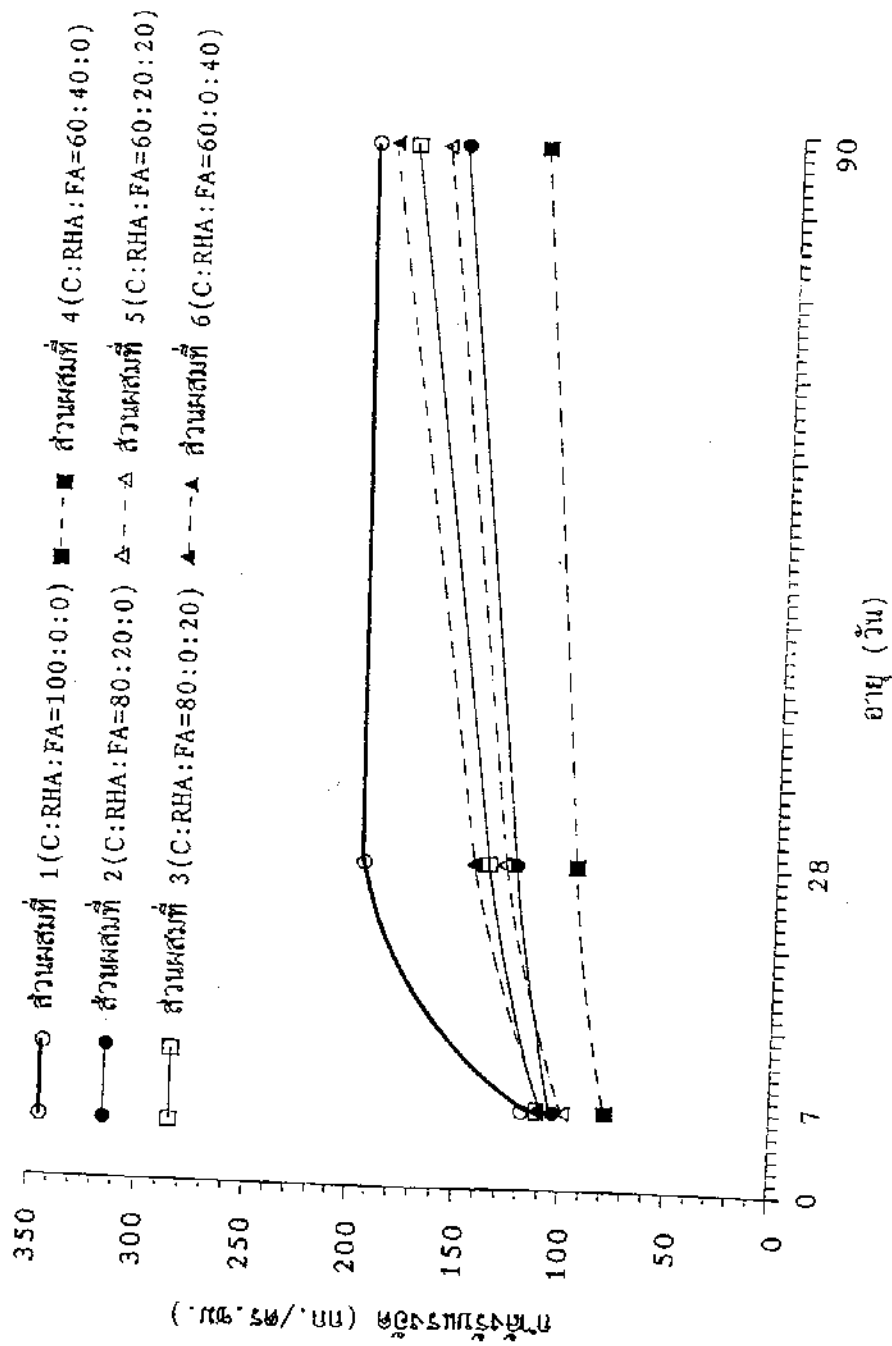


ภาพที่ 4.4ข. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ RCC โดยใช้ปริมาณน้ำ

เท่ากับ 5 ข ของมวลรวมแห้ง



ภาพที่ 4.4ค. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ RCC โดยใช้น้ำ
เท่ากับ 6 % ของมวลรวมแห้ง



ภาพที่ 4.4ง. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ RCC โดยใช้น้ำ
เท่ากับ 7 % ของมวลรวมแห้ง

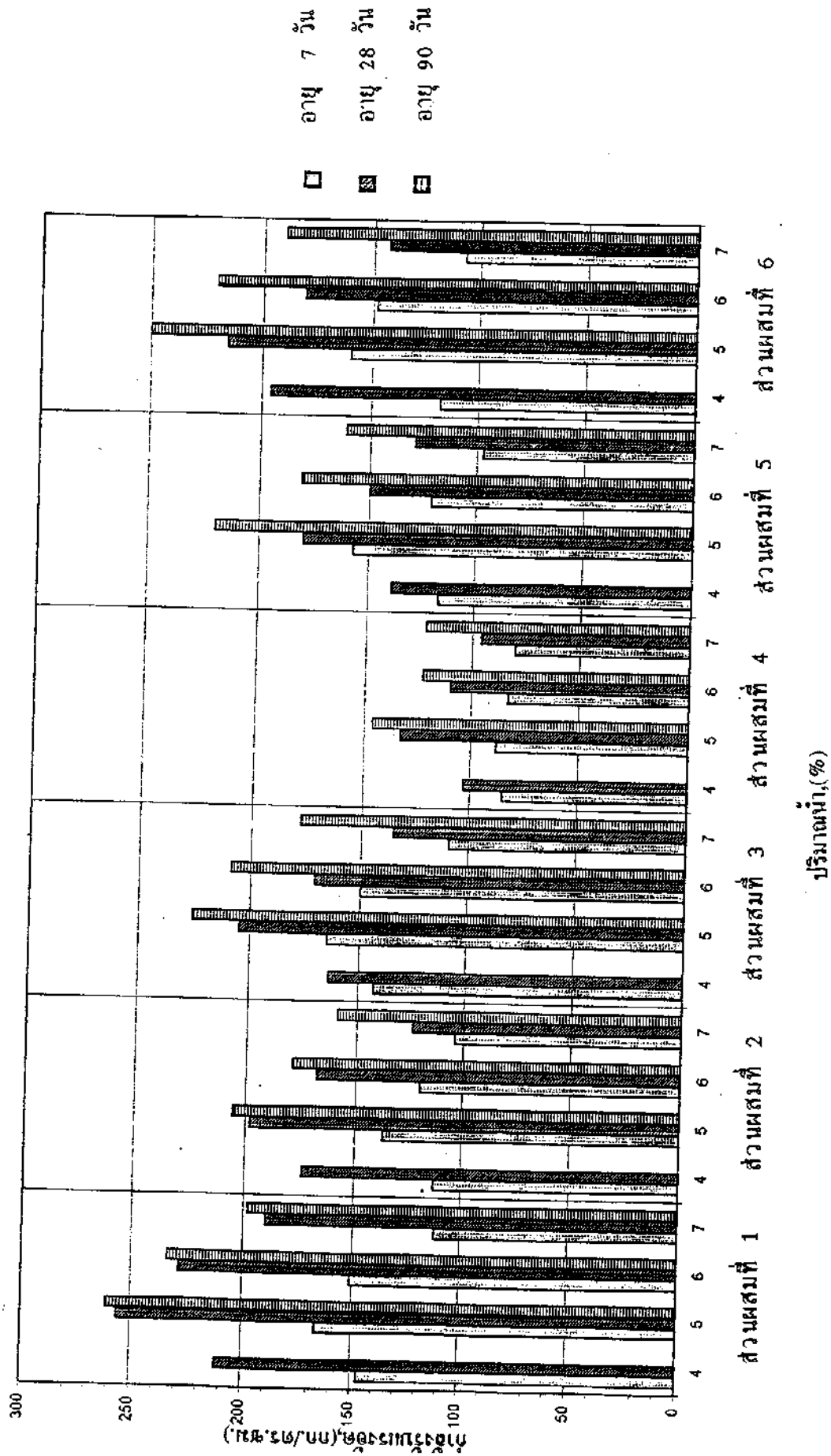
4.4 ผลของปริมาณน้ำที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและการบดอัด

จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.4 ก. ข. ค. และ ง. จะเห็นได้ว่า กำลังรับแรงอัดของ RCC มีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในช่วงการทดลอง มีค่าลดลง ปริมาณน้ำที่ใช้ในช่วงทดลองคือ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดสอบการบดอัดมีค่าเท่ากับ 6 % และปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมคือ 5 % และ 7 % ในคอนกรีตธรรมดาเมื่อปริมาณสารซีเมนต์เพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดลดลงเป็นไปตามกฎของออบรามส์ (Abram's Law) และ Joshi และ Natt (1983) ได้รายงานผลการวิจัยไว้ว่าค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดสอบการบดอัด มักจะเป็นปริมาณน้ำที่มากเกินไปพอสำหรับการเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุเชื่อมประสานในส่วนผสมของ RCC จากผลการทดลอง ของ Rahimi (1987) ซึ่งทำการบดอัด หรือบรรจุแน่นโดยใช้โรตารี เขย่า และ Kango Hammer ใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด 6x12 นิ้ว พบว่า RCC ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ปริมาณน้ำมากกว่าค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม ผลการทดสอบของ Moffat และ Prince (1978) ซึ่งบดอัดโดยลูกตุ้ม (Hammer) และใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด 6x4.584 นิ้ว พบว่า RCC ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ปริมาณน้ำน้อยกว่าค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม และจากผลการทดสอบของ Kajorncheappunnngm (1990) ซึ่งบดอัดโดย Kango Hammer พบว่า RCC ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ปริมาณน้ำน้อยกว่าค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม จากผลการทดลองเหล่านี้เห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของ RCC กับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับวิธีการบดอัด (เช่นการบดอัดโดยใช้ลูกตุ้ม ซึ่งมีทั้งการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานและการทดสอบการบดอัดแบบโรตารีพาด์, การบดอัดโดยใช้ Kango Hammer และการบดอัดโดยใช้โรตารี เขย่า) กล่าวคือ วิธีการบดอัดที่ใช้พลังงานในการบดอัดมากก็จะทำให้วัสดุที่ถูกบดอัดมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันจะมีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมลดลง นอกจากนี้แล้วปัจจัยอื่น ๆ เช่น ปฏิกิริยาไฮเดรชัน การระเหย และการดูดซับน้ำ ปริมาณวัสดุปอซโซลาน ปริมาณของมวลรวมและสารผสมเพิ่ม ก็ล้วนมีผลต่อค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมเช่นกัน (ACI Committee 207, 1983)

เพื่อเป็นการตรวจสอบ และเพื่อที่จะหาค่าปริมาณน้ำที่ทาให้ทั้ง 6 ส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด จึงได้ทำการหล่อแท่งตัวอย่าง RCC เพิ่มขึ้นอีก 1 ชุด โดยเลือกใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 4 % และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างที่อายุ 7 วันและ 28 วัน ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ญ. และ สรุปไว้ในภาพที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของทุกส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำ 4 % มีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของทุกส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำ 5 % 6 % และ 7 % แสดงว่าค่าปริมาณน้ำที่ทาให้ทั้ง 6 ส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด มีค่าประมาณ 5 %

เมื่อพิจารณาผลการบดอัดดังแสดงในภาพที่ 4.2 ค. และผลของกำลังรับแรงอัดดังแสดงในภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด และปริมาณน้ำมีลักษณะคล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัดและปริมาณน้ำ แต่ปริมาณน้ำมีค่าสูงสุดของเส้นกราฟการบดอัดกับปริมาณน้ำที่ค่าสูงสุดของเส้นกราฟกำลังรับแรงอัดไม่ได้อยู่ที่ค่าเดียวกัน ทุก ๆ ส่วนผสมมีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบการบดอัด (มีค่าประมาณ 6 %) มากกว่าค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (มีค่าประมาณ 5 %) ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบการบดอัดดิน โดยทั่วไปแล้วดินที่ได้รับการบดอัดที่ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะมีกำลังสูงสุด สาเหตุเนื่องมาจากคุณสมบัติที่แตกต่างกันของดินและคอนกรีตกล่าวคือ กำลังของดินขึ้นอยู่กับลักษณะของการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน ที่ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมการจัดเรียงของเม็ดดินจะใกล้ชิดกันที่สุด ทาให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและกำลังรับแรงของดินสูงสุดเช่นกัน แต่สำหรับกำลังของคอนกรีตนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับ การบดอัดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุเชื่อมประสานด้วย (Rahimi, 1987)

จากเส้นกราฟการบดอัดและเส้นกราฟกำลังรับแรงของทั้ง 6 ส่วนผสม เมื่อพิจารณาเส้นกราฟทางด้านขวาของจุดสูงสุด พบว่ามีกำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้มากเกินไป ที่ปริมาณน้ำ 6 % และ 7 % ปริมาณน้ำจะมีมากเกินไป ทาให้ส่วนผสมค่อนข้างเหลว การบดอัดทาได้ยากจึงได้ความหนาแน่นแห้งต่ำ และกำลังรับแรงอัดต่ำ เพราะค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์สูงไป ที่ปริมาณน้ำ 6 % ถึงแม้ว่าจะเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสม ทาให้สามารถบดอัดได้



ภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ RCC โดยใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 4%, 5%, 6% และ 7% ของมวลรวมแห้ง

อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ RCC มีความหนาแน่นแข็งสูงสุด แต่กำลังรับแรงอัดยังคงไม่เท่ากับกำลังรับแรงอัดสูงสุด กำลังรับแรงอัดยังคงเพิ่มขึ้นจากกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมเดียวกันที่มีน้ำอยู่ 7 % เนื่องจากค่าอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ลดลง ที่ปริมาณน้ำ 5 % ส่วนผสมค่อนข้างแห้ง การบดอัดทำได้ยากขึ้น ความหนาแน่นแข็งเริ่มลดลงอีกครั้ง แต่กำลังรับแรงอัดยังคงเพิ่มมากขึ้น จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังของกราฟทางด้านซ้ายเป็นไปตามกฎของแอบรามา (Abram's Law) ที่ว่าการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตเมื่อปริมาณวัสดุซีเมนต์คงที่จะทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น (Rahimi, 1987) เมื่อลดปริมาณน้ำลงมาอีกเหลือ 4 % กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้น้อยเกินไปจนปริมาณเพสต์ที่มีไม่เพียงพอที่จะเข้าไปแทรกตามช่องว่างระหว่างมวลรวมได้หมด

ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดสอบการบดอัดในห้องทดลอง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม ปริมาณวัสดุละเอียด ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน และพลังงานที่ใช้ในการบดอัด ดังนั้นการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ออกแบบปฏิบัติภาคส่วนของ RCC โดยใช้หลักการของการบดอัดดินจะต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของ RCC และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่หาจากการทดสอบการบดอัดควบคู่กันไป การเลือกวิธีการบดอัดในการหาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม ควรจะต้องพิจารณาด้วยว่าปริมาณน้ำที่ได้ต้องเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีปริมาณเพสต์ที่แทรกตามช่องว่างของเนื้อ RCC อย่างเพียงพอ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบการบดอัดค่อนข้างอ่อนไหวไปตามวิธีการบดอัด ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการบดอัดที่ให้ผลใกล้เคียงกับการบดอัดจริงในสนาม จะได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่แม่นยำยิ่งขึ้น และส่งผลให้ปฏิบัติภาคส่วนที่ออกแบบมีความเหมาะสมต่อการนำพาใช้งานมากขึ้น