บทที่ 4

ตัวอย่างการออกแบบ

4.1 ทั่วไป

เพื่อเป็นการทดสอบการใช้งานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงที่พัฒนาขึ้น จะนำเสนอตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งสามประเภท ได้แก่ ส่วนผสมของคอนกรีตไหล คอนกรีตหลา และ คอนกรีตกำลังสูง รวมทั้งเปรียบเทียบส่วนผสมผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบกับส่วนผสมคอนกรีตที่มีคุณสมบัติเทียบเคียงโดยวิธีออกแบบดั้งเดิม และเพื่อยืนยันความถูกต้องของส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบ จะทำการทดลองผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงในห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งทดสอบคุณสมบัติหลัก ได้แก่ กำลังอัด ค่าการยุบตัว และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัวของคอนกรีต

4.2 ตัวอย่างการออกแบบ

ตัวอย่างส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ทำการออกแบบถูกแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม ได้แก่ ส่วนผสมของคอนกรีตไหล คอนกรีตหลา และคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. ส่วนผสมคอนกรีตไหล ออกแบบส่วนผสมจำนวน 2 ตัวอย่าง มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 25 เมกะปาสคาล และ 35 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยออกแบบให้ส่วนผสมที่ 1 มีค่ายุบตัวระหว่าง 20-22.5 เซนติเมตร และการไหลตัวระหว่าง 57 – 62.5 เซนติเมตร และส่วนผสมที่ 2 มีค่ายุบตัวสูงกว่า 25 เซนติเมตร และ การไหลตัวสูงกว่า 68 เซนติเมตร และทั้งสองส่วนผสมจะมีค่ายุบตัวเริ่มแรกอยู่ระหว่าง 7.5 – 10 เซนติเมตร

ข. ส่วนผสมคอนกรีตหลา ออกแบบส่วนผสมจำนวน 2 ตัวอย่าง มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 20 และ 30 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยในส่วนผสมที่ 1 จะมีค่ายุบตัวเริ่มต้นระหว่าง 5.0-7.5 เซนติเมตร มีค่ายุบตัวระหว่าง 20.0-22.5 เซนติเมตร การไหลตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 57.0-62.5 เซนติเมตร สำหรับในส่วนผสมที่สอง ไม่จำเป็นต้องมีค่ายุบตัวเริ่มต้น มีค่ายุบตัวและการไหลตัวเช่นเดียวกับส่วนผสมแรก โดยส่วนผสมที่ทำการออกแบบต้องควบคุมมิให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดมากกว่า 45 องศาเซลเซียส

ค. ส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง ออกแบบส่วนผสมจำนวน 2 ตัวอย่าง มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 60 เมกะปาสคาล และ 80 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยส่วนผสมที่ 1 ต้องการค่ายุบตัวเริ่มต้นระหว่าง 2.5 – 5 เซนติเมตร ในขณะที่ส่วนผสมที่ 2 และ 3 ไม่ต้องการค่ายุบตัวเริ่มต้น และส่วนผสมทั้งหมดต้องมีค่ายุบตัวระหว่าง 20 – 22.5 เซนติเมตร และ มีค่าการไหลตัวระหว่าง 52 – 57.5 เซนติเมตร รายละเอียดคุณสมบัติคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ทำ

การออกแบบแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

4.2.1 ตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุผสมที่ใช้

คอนกรีตสมรรถนะสูงตัวอย่างที่ทำการออกแบบทั้งสามประเภท จะใช้วัสดุผสมชุดเดียวกันทั้งหมด โดยที่คุณสมบัติของวัสดุผสมต่าง ๆ ที่ใช้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. มวลรวมหยาบ – เป็นมวลรวมประเภทหินปูนย่อยที่ผ่านเกณฑ์การควบคุมคุณภาพของอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จโดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท น่ำเฮง คอนกรีต (1992) จำกัด มีขนาดโตสุดระบุ เท่ากับ 20 มม. และ 10 มม. โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.69 มีค่าร้อยละของการดูดซึม เท่ากับ 0.35 โดยน้ำหนัก และมีค่าร้อยละที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานโดยน้ำหนัก ที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลของหน่วยผลิตแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ข. มวลรวมละเอียด – เป็นทรายแม่น้ำ ที่ผ่านเกณฑ์การควบคุมคุณภาพของอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท น่ำเฮง คอนกรีต (1992) จำกัด มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.08 โดยเฉลี่ย มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59 ค่าร้อยละของการดูดซึมเท่ากับ 0.95 โดยน้ำหนัก และมีค่าร้อยละที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานโดยน้ำหนัก แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ค. ปูนซีเมนต์ - ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง ผลิตโดย บริษัท สยามซีเมนต์ จำกัด มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานมาตรฐาน มอก.15-2523 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแบบเบลนท์เท่ากับ 2,900 ตารางเซนติเมตร/กรัม

ง. น้ำสำหรับผสมคอนกรีต – เป็นน้ำประปาจากห้องปฏิบัติการคอนกรีต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ. แร่ธาตุผสมเพิ่ม - แร่ธาตุผสมเพิ่มที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง ได้แก่ เถ้าลอย จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ได้รับความอนุเคราะห์ จากบริษัท น่ำเฮง คอนกรีต (1992) จำกัด มีองค์ประกอบทางเคมีแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 จัดเป็นเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐานของ ASTM C 618

ฉ. สารเคมีผสมเพิ่ม – ใช้สารลดน้ำพิเศษ DARACEM-100® ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด มีคุณสมบัติสอดคล้องกับ มาตรฐาน มอก.985-2533 และ ASTM C214 ชนิด G มีอัตราการใช้ที่แนะนำโดยผู้ผลิตอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 1.5 ลิตรต่อ น้ำหนักของซีเมนต์ 100 กก.

ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุผสมในโปรแกรมสำหรับออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง แสดงได้ดังรูปที่ 4.1

4.2.2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ก. การผสมมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

จากการทดลองผสมมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด พบว่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบขนาดโตสุด 20 มม. 10 มม. และ มวลรวมละเอียด ที่ทำให้เข้าช่ายข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง และมีค่าเบี่ยงเบนจากค่ากลางน้อยที่สุด เท่ากับ 36.40% 19.90% และ 43.70% ตามลำดับ โดยมีขนาดคละร่วมของมวลรวมแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ปริมาณช่องว่างของมวลรวมเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง จากผลการทดสอบปริมาณช่องว่างและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมในสภาวะแห้งและอัดแน่น ตามมาตรฐานของ ASTM C 29/ C29 M พบว่าจากการผสมมวลรวมหยาบขนาดโตสุดระบุ 20 มม. และ 10 มม. ในสัดส่วน 65 ต่อ 35 จะทำให้เกิดปริมาณช่องว่างอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 42 – 44 และทรายที่ใช้มีปริมาณช่องว่างระหว่างร้อยละ 37 – 39 โดยผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และเมื่อทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณช่องว่างของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดที่ใช้ตามสัดส่วนที่คำนวณได้พบว่าได้ปริมาณช่องว่างอยู่ระหว่างร้อยละ 27 – 29 โดยผลของการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.6

ข. คำนวณส่วนผสมคอนกรีตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การออกแบบจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ในรูปที่ 4.3 จะแสดงตัวอย่างภาพของหน้าต่างสำหรับการออกแบบที่ได้รับการป้อนข้อมูลอย่างสมบูรณ์ ของส่วนผสมตัวอย่าง H-1 โดยผลลัพธ์ของการออกแบบที่ได้จะเป็นปริมาณวัสดุผสม รวมทั้งน้ำยาเคมีผสมเพิ่มที่ต้องใช้ต่อหน่วยลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต พร้อมทั้งกราฟแสดงสัดส่วนของวัสดุผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.7 แสดงส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบที่ได้จากการคำนวณออกแบบ

4.3 การเปรียบเทียบส่วนผสมคอนกรีตกับวิธีการออกแบบดั้งเดิม

จากที่ผ่านมาจะสังเกตได้ว่าการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงนั้น ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญเพิ่มเติมจากการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตดั้งเดิม ได้แก่ การผสมมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดให้มีขนาดคละภายใต้ข้อกำหนด และการปรับแต่งส่วนผสมด้วยสารเคมีผสมเพิ่ม ดังนั้นจึงคาดการณ์ได้ว่าส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงก่อนทำการปรับแต่งด้วยสารเคมีผสมเพิ่มน่าจะคล้ายคลึงกับส่วนผสมของคอนกรีตแบบดั้งเดิม ด้วยเหตุนี้ จึงทำการเปรียบเทียบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงจากการคำนวณออกแบบด้วยโปรแกรม กับวิธีมาตรฐานที่ใช้ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตในปัจจุบัน เพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมของส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบทั้งด้านของ ปริมาณวัสดุผสมที่ใช้ และความเหมาะสมในเชิงพาณิชย์สำหรับการผลิตใช้งาน

4.3.1 การศึกษาเปรียบเทียบ

งานวิจัยจะทำการศึกษาเปรียบเทียบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ได้จากการคำนวณออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กับส่วนผสมของคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเริ่มต้น และกำลังอัดเป้าหมายที่อายุ 28 วันเท่ากัน จาก

การออกแบบด้วยวิธีมาตรฐาน ได้แก่ วิธีของ ACI 211.1-91 [13] ACI 211.4R-93 [31] DOE [12] และ วิธีของ Road Note No. 4 [11] โดยแบ่งกลุ่มส่วนผสมตามตัวอย่างการออกแบบ และใช้วิธีการออกแบบสำหรับเปรียบเทียบดังแสดงได้ดังตารางที่ 4.8

เนื่องจากมาตรฐานการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของอังกฤษ ได้แก่วิธีของ DOE และ Road Note No. 4 อ้างอิงค่ากำลังอัดของคอนกรีตจากตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ในขณะที่ในงานวิจัย และ วิธีการของ ACI อ้างอิงค่ากำลังอัดจากตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน ในการเปรียบเทียบจึงต้องทำการแปลงค่ากำลังอัดจากตัวอย่างทรงลูกบาศก์เป็นค่ากำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอก โดยสมการที่เสนอโดย Neville ดังนี้

$$R = 0.76 + 0.20 \log \frac{fcu}{2840} \qquad (4.1)$$

โดยที่ R คือ อัตราส่วนกำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอกต่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์

fcu คือ ค่ากำลังอัดระบุของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ (Cube Strength) มีหน่วยเป็น ปอนด์ ต่อ ตารางนิ้ว (psi)

4.3.2 การเปรียบเทียบส่วนผสม

4.3.2.1 ปริมาณซีเมนต์ และ อัตส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมสามารถใช้เป็นดัชนีเพื่อบ่งบอกความประหยัดของส่วนผสมได้โดยตรง เนื่องจากซีเมนต์เป็นวัสดุผสมที่มีต้นทุนการผลิตสูงที่สุด หากคอนกรีตมีคุณสมบัติเท่าเทียมกันแล้ว ส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์สูงกว่าย่อมที่จะมีราคาสูงกว่า ในส่วนผสมของคอนกรีตไหลและคอนกรีตหลาซึ่งมีกำลังอัดต่ำ (ส่วนผสม F-1 และ M-1,M-2) ปริมาณซีเมนต์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมจะมีความใกล้เคียงกับวิธีการออกแบบอื่น ๆ แทบทุกวิธี โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 เว้นแต่วิธีการของ Road Note No.4 ให้ปริมาณซีเมนต์ที่สูงกว่า ในกรณีของส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้นนั้น ส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบจะมีปริมาณซีเมนต์ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากวิธีการของ DOE โดยมีค่าสูงกว่าวิธีของ ACI 211.4 เล็กน้อย แต่ในวิธีของ ACI 211.1 และ Road Note No. 4 จะให้ปริมาณซีเมนต์ที่สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมต้องการปริมาณน้ำที่สูงกว่าและความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดมีค่าอนุรักษ์มาก และในวิธีการของ DOE จะให้ค่าของปริมาณซีเมนต์ที่ต่ำกว่าทุก ๆ วิธี เนื่องจากค่าอัตส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เสนอโดยวิธีของ DOE มีค่าสูงกว่าสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากัน

สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงมากนั้น (ส่วนผสม H-1 และ H-2) พบว่าปริมาณซีเมนต์ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการของ ACI 211.4 จะใกล้เคียงกับส่วนผสมที่คำนวณได้จากโปรแกรมมากกว่าส่วนผสมที่คำนวณโดยวิธีการของ DOE โดยคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5

4.3.2.2 ปริมาณน้ำ

ในทุก ๆ วิธีการออกแบบจะให้ค่าปริมาณน้ำของส่วนผสมที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในวิธีการของ ACI และ DOE จะให้ค่าคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 จากส่วนผสมที่ได้จากการคำนวณ แต่ในวิธีการของ Road Note No.4 จะให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่คำนวณไม่เกินร้อยละ 10

4.3.2.3 สัดส่วนของมวลรวมหยาบ และ มวลรวมละเอียด

โดยวิธีการคำนวณของ ACI จะกำหนดสัดส่วนของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดจาก ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดเป็นสำคัญ และในวิธีของ DOE จะพิจารณาถึงปริมาณส่วนละเอียด (ผ่านตะแกรงมาตรฐานอังกฤษ ขนาด 600 ไมโครเมตร , หมายเลข 25) ของมวลรวมละเอียด สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ ซึ่งจะพิจารณาได้ว่าในวิธีการดังกล่าวจะทำการควบคุมขนาดคละโดยรวมของมวลรวมโดยวิธีการทางอ้อมซึ่งให้ผลดีในกรณีที่มวลรวมที่ใช้มีคุณสมบัติใกล้เคียง หรือเทียบเท่ากับมวลรวมในการวิจัยร่างมาตรฐาน ซึ่งการนำมาใช้งานจะต้องทำการปรับแก้ส่วนผสมตามความเหมาะสม ในงานวิจัยจะคำนวณสัดส่วนการผสมของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด เพื่อให้ได้ขนาดคละรวมอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง ซึ่งจะสามารถประกันถึงการกระจายขนาดคละที่ดี อันจะส่งผลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตในสภาวะเหลว

จากผลการออกแบบ แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของคอนกรีตไหล และคอนกรีตหลาที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำนั้น สัดส่วนการผสมของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยในรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งขนาดคละร่วมของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ในกรณีของคอนกรีตกำลังสูงซึ่งมีปริมาณของส่วนละเอียดที่สูงมาก ในวิธีการออกแบบทุกวิธีจะลดส่วนละเอียดลง โดยเฉพาะวิธีการของ ACI 211.4 นั้นส่วนผสมจะมีมวลรวมละเอียดน้อยกว่าร้อยละ 30 ซึ่งหากพิจารณาจากรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะพบว่าส่วนผสมจะมีความหยาบกว่าข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง ซึ่งคาดว่าความสามารถในการยึดเกาะตัวของส่วนผสมจะลดลง เนื่องจากการผิตคอนกรีตกำลังสูงจะต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในอัตราที่สูงกว่าปกติ ซึ่งทำให้ซีเมนต์เกิดการกระจายตัว และส่วนผสมจะมีกำลังเฉือนลดลงอย่างมาก หากปราศจากมวลรวมละเอียดซึ่งมีความเฉื่อยไม่ทำปฏิกริยากับสารลดน้ำพิเศษแล้ว ส่วนผสมจะมีความเสี่ยงต่อการแยกตัวที่สูง ซึ่งมักเกิดในการเทด้วยวิธีปั๊มพ์ หรือเมื่อมีการไหลตัวสูงมากเกินไป

4.3.2.4 สัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์

สัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์สามารถใช้เป็นดัชนีเพื่อบ่งบอกถึงความประหยัดของส่วนผสมได้ โดยส่วนผสมมีสัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์ต่ำกว่าจะมีราคาต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยปริมาตรสูงกว่า[54] จากการเปรียบเทียบพบว่า ในช่วงของคอนกรีตกำลังอัดต่ำ (ส่วนผสม I-1) พบว่าวิธีการของ Road Note No. 4 จะให้ส่วนผสมที่มีค่าสัดส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์มีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่การออกแบบโดยวิธีการของ DOE จะให้ส่วนผสมที่มีสัดส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์มีค่าสูงสุด ในขณะที่วิธีการคำนวณในงานวิจัย จะให้ส่วนผสมที่มีสัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์สูงกว่าวิธีการของ ACI 211.1 เพียงเล็กน้อย

สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงขึ้นนั้น (ส่วนผสม F-2 H-1 และ H-2) พบว่าการคำนวณโดยวิธีการของ ACI 211.1 และวิธีการของ Road Note No.4 จะให้ส่วนผสมที่มีสัดส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ต่ำมาก เนื่องจากมีปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมสูงมากซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงในทางปฏิบัติ ในขณะที่ วิธีการของ ACI 211.4 และ DOE จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่วิธีการของงานวิจัย จะให้ค่าสัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์อยู่ระหว่างวิธีทั้งสองนี้

4.3.2.5 หน่วยน้ำหนักของส่วนผสม

ค่าหน่วยน้ำหนักของส่วนผสม ในที่นี้ คือน้ำหนักรวมของวัสดุผสมต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในทุก ๆ วิธีมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ร้อยละ 3 อย่างไรก็ตามเนื่องจากมวลรวมที่ได้จากการคำนวณออกแบบโดยวิธีของ ACI จะอยู่ในสภาวะแห้งในเตาอบ ในขณะที่มวลรวมที่ทำการออกแบบโดยวิธีอื่น ๆ จะอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่คำนวณได้จากวิธีของ ACI จะให้ค่าที่น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ เล็กน้อย ผลการเปรียบเทียบส่วนผสมคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณออกแบบ และวิธีการมาตรฐานสำหรับคอนกรีตแบบดั้งเดิม แสดงได้ดังตารางที่ 4.9

4.4 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง

4.4.1 การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตเป็นกระบวนการเพื่อทำให้ส่วนผสมมีการคลุกเคล้ากันได้อย่างสม่ำเสมอ กล่าวคือผิวมวลรวมจะต้องถูกเคลือบด้วยอนุภาคผง ได้แก่ ซีเมนต์ และแร่ธาตุผสมเพิ่ม ซึ่งอนุภาคผงนี้จะถูกเคลือบด้วยน้ำหรือของเหลวทั้งหมดในส่วนผสม ซึ่งจะทำให้ส่วนผสมคอนกรีตที่ได้มีความเป็นหนึ่งเดียว ซึ่งจะต้องไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากการขนส่งหรือการทำงาน [37]

เพื่อควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง การผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงต้องให้ความใส่ใจกับกระบวนการผสมเป็นพิเศษ งานวิจัยได้ใช้เครื่องผสมแบบกะทะ (Pan Type Mixer) ความจุ 100 ลิตร โดยใช้ปริมาตรของส่วนผสมในการทดสอบอย่างน้อย 40 ลิตร

1. เตรียมโม่ผสมโดยล้างให้สะอาด เทน้ำออกและเช็ดผิวโม่ให้แห้งพอหมาด ๆ เพื่อให้ผิวของโม่ไม่ดูดซึมความชื้นผิวของมวลรวม
2. ใส่ทรายที่เตรียมไว้ทั้งหมดลงในโม่ผสม และหมุนโม่ใช้เวลาประมาณ 1 นาที
3. นำทรายประมาณ 200 กรัม มาทดสอบเพื่อหาความชื้นผิว (Surface Moisture) ตามวิธีการของ ASTM C 70
4. ปรับแก้ส่วนผสมเนื่องจากความชื้นผิวของทรายที่ใช้ โดยการชั่งทรายเพิ่มและปรับลดปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม
5. ใส่หินทั้งหมดลงในโม่และหมุนโม่เพื่อทำการผสมมวลรวมให้คลุกเคล้ากัน ใช้เวลาประมาณ 1 นาที โดยหินที่ใช้ในการผสมต้องทำให้อยู่ในสภาพอิ่มผิวแห้ง จึงไม่ต้องทำการปรับแก้ส่วนผสมเนื่องจากความชื้นผิวของมวลรวมหยาบ
6. ใส่วัสดุผงที่ใช้ทั้งหมดลงในโม่ และหมุนโม่ให้มวลรวมและวัสดุผงเข้ากัน ใช้เวลาประมาณ 1 นาที
7. เติมน้ำทั้งหมดส่วนลงในโม่ และทำการผสมจนได้ระดับความเข้มของพลังงานที่เหมาะสม (Optimum Mixing Intensity) โดยส่วนผสมจะเข้ากันได้ที่ และให้นำคอนกรีตบางส่วนมาทดสอบค่ายุบตัวเริ่มต้น โดยในระหว่างการทดสอบต้องคลุมพลาสติกปิดฝาโม่อย่างมิดชิดเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของส่วนผสม โดยเฉพาะในขณะที่อากาศภายนอกมีความร้อนจัด หรือ มีลมพัดแรง

8. ใส่ส่วนผสมที่นำมาทดสอบค่ายุบตัวเริ่มต้นกลับลงไป แล้วเดินเครื่องผสมต่อเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน หลังจากนั้นให้เติมน้ำยาเคมีผสมเพิ่ม และผสมต่อให้ส่วนผสมเข้ากัน โดยใช้เวลาหลังจากซีเมนต์สัมผัสกับน้ำไม่น้อยกว่า 1 นาที และ ไม่เกิน 5 นาที

ในกรณีของส่วนผสม H-2 ซึ่งมีน้ำน้อยมากจะประสพปัญหากับสารเคมีผสมเพิ่มที่ผสมไม่สามารถกระจายเข้าเคลือบส่วนผสมได้ทั้งหมด ซึ่งในกรณีนี้สารเคมีผสมเพิ่มอาจจะเข้าเคลือบผิวของอนุภาคซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นเยื่อกั้นน้ำมิให้เข้าทำปฏิกริยา ซึ่งจะทำให้คอนกรีตไม่แข็งตัว วิธีที่มีประสิทธิภาพคือให้ทำการละลายสารเคมีผสมเพิ่มกับน้ำและเติมลงในขั้นตอนที่ 7 ทั้งหมดโดยไม่จำเป็นต้องวัดค่ายุบตัวเริ่มต้น

4.4.2 การทดสอบคุณสมบัติหลัก

4.4.2.1 การทดสอบการยุบตัว

ค่ายุบตัวเป็นดัชนีที่ใช้บ่งบอกได้ถึง ความสามารถทำงานได้ และคุณสมบัติด้านความยึดเกาะตัวของคอนกรีต ซึ่งสามารถดำเนินการตามมาตรฐานของ ASTM C-143 โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยกรวยตัดสูง 305 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายบน และ ที่ฐานเท่ากับ 102 มิลลิเมตร และ 203 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยในการทดสอบจะแบ่งคอนกรีตใส่ลงในโคนทั้งหมด 3 ชั้น ในปริมาณเท่า ๆ กัน และในแต่ละชั้นต้องทำการกระทุ้งด้วยเหล็กตำ (Tamping Steel Rod) ปลายกลมมน ที่มีความยาว 600 มิลลิเมตร และ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 16 มิลลิเมตร อย่างสม่ำเสมอ จำนวน 25 ครั้ง ต่อชั้น โดยชั้นล่างให้กระทุ้งจนสุด ส่วนชั้นสองและสามให้กระทุ้งผ่านชั้นถัดไปเล็กน้อย ระหว่างการกระทุ้งชั้นบนสุดให้เติมคอนกรีตให้ล้นปากแบบตลอดเวลา โดยขณะทำการทดสอบจะต้องตรึงโคนทดสอบให้อยู่กับที่ ปาดปากโคน และทำความสะอาดที่ปลาย ยกโคนขึ้นตรง ๆ โดยไม่ต้องหมุน หลังจากนั้นวัดค่าการยุบตัวของคอนกรีตซึ่งคือ ผลต่างระหว่างความสูงของโคนและระยะความสูงของคอนกรีตที่ยุบตัวลงแล้ว

4.4.2.2 การทดสอบการไหลตัว

สำหรับคอนกรีตที่มีความข้นเหลวมาก หรือ คอนกรีตที่มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษ คอนกรีตจะมีคุณสมบัติพิเศษ กล่าวคือ มีความยึดเกาะสูง และมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้ดี การวัดค่าการไหลตัวของคอนกรีต นอกจากจะเป็นการประเมินความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตแล้ว ยังเป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมในการไหลตัวของคอนกรีตภายหลังจากถูกอัดแน่น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานคอนกรีตสมรรถนะสูง

การทดสอบค่าการไหลตัวของคอนกรีตสามารถดำเนินการตามมาตรฐานของ DIN 1048 โดยมีเครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย โต๊ะการไหล (Flow Table) มีขนาด 700 x 700 มิลลิเมตร ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ส่วนฐาน และส่วนเชื่อมต่อแบบยึดหมุนที่สามารถยกขึ้นลงได้ในช่วงระยะห่าง 40 มิลลิเมตร กรวยตัด สูง 200 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง บน และ ล่างเท่ากับ 130 และ 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยการทดสอบจะแบ่งคอนกรีตลงในกรวยเป็น 2 ชั้นเท่า ๆ กัน และในแต่ละชั้นจะกระทุ้งด้วยเหล็กตำ 10 ครั้ง เมื่อตำชั้นสุดท้ายแล้วให้ปาดให้เรียบ และทำความสะอาดโต๊ะเขย่า ยกกรวยออก และกระแทกโต๊ะเขย่า 15 ครั้ง ภายใน 15 วินาที ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการไหลตัวอย่างน้อย 2 ทิศทางตั้งฉากกัน

4.4.2.3 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบเพื่อหากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C-39 โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร สำหรับคอนกรีตไหล และคอนกรีตหลา และตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร สำหรับคอนกรีตกำลังสูง โดยทำการทดสอบหากำลังอัดที่อายุ 28 วัน สำหรับส่วนผสมคอนกรีตไหล และส่วนผสมคอนกรีตหลา 1 วัน 7 วัน และ 28 วัน สำหรับคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่อายุละ 3 ตัวอย่าง

การหล่อตัวอย่างทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C-192 โดยแบ่งตักคอนกรีตใส่ในแบบหล่อ 3 ชั้นเท่า ๆ กัน และในแต่ละชั้นทำการกระทุ้งด้วยเหล็กตำชั้นละ 25 ครั้ง เสร็จแล้วปาดให้เรียบ ต้องให้ความใส่ใจกับสภาพที่ปลายของตัวอย่างเป็นพิเศษ โดยก่อนทำการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตไหล และคอนกรีตหลา จะแค็ปปลายตัวอย่างทดสอบด้วยกำมะถันผสมกราไฟต์ แต่เฉพาะส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงจะไม่ทำการแค็ปปลายแต่จะใช้กระจกผิวเรียบช่วยในการปรับแต่งระนาบของผิวบนของตัวอย่างเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการวิบัติของหัวแค็ปที่เคลือบปลายก่อนหน่วยแรงอันควร

4.4.3 การเปรียบเทียบ

4.4.3.1 สภาวะเหลว

ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาวะเหลว และกำลังอัด ที่อายุต่าง ๆ ของตัวอย่างทดสอบเปรียบเทียบกับค่าที่ทำการออกแบบแสดงได้ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติในสภาวะเหลวของส่วนผสมตัวอย่างมีความสอดคล้องกับค่าที่ทำการออกแบบ โดยเฉพาะ ค่ายุบตัว ของส่วนผสมภายหลังเติมน้ำยาเคมีผสมเพิ่มอยู่ในช่วงที่ทำการออกแบบทั้งหมด อย่างไรก็ตามค่ายุบตัวเริ่มต้นจากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่ทำการออกแบบเล็กน้อย เนื่องมาจากสภาพของมวลรวมหยาบที่ใช้ค่อนข้างแห้งซึ่งในขณะผสมจะมีน้ำบางส่วนสูญเสียไปกับการเคลือบผิวมวลรวมหยาบเหล่านี้สูงเกินกว่าที่คาดการณ์ไว้ โดยมีค่าผิดพลาดอยู่ในขอบเขต ไม่เกิน 3 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขอบเขตความผิดพลาดของสมการทำนายโดยหลักการของน้ำอิสระ และยอมรับได้ในทางปฏิบัติตามมาตรฐาน มอก.213-2520 ค่าการไหลตัวและการยุบตัวสุดท้ายของส่วนผสมมีความใกล้เคียงกับค่าที่ทำการออกแบบ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขต 2.5 เซนติเมตร ซึ่งยอมรับได้ตามมาตรฐาน มอก.213-2520 เช่นกัน

4.4.3.2 สภาวะแข็งตัว

ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งสามกลุ่มสามารถสรุปได้ดังนี้

ก. คอนกรีตไหล - ส่วนผสม F-1 ทั้งหมดมีกำลังอัดสูงกว่าค่าที่ทำการออกแบบ โดยมีค่ากำลังอัดสูงกว่าค่ากำลังอัดเป้าหมายอยู่ในช่วงร้อยละ 35 ถึง 45 สำหรับส่วนผสม F-2 มี 1 ตัวอย่างที่มีกำลังอัดต่ำกว่าค่ากำลังอัดเป้าหมายอยู่ ร้อยละ 12 ซึ่งยังสูงกว่าร้อยละ 85 ของกำลังอัดที่ทำการออกแบบ จึงสามารถยอมรับได้ตามมาตรฐาน มอก.213-2520

ข. คอนกรีตหลา – ส่วนผสม M-1 จำนวน 2 ตัวอย่างมีกำลังอัดต่ำกว่าค่ากำลังอัดเป้าหมายอยู่ร้อยละ 14 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งยังสูงกว่าร้อยละ 85 ของกำลังอัดที่ทำการออกแบบ จึงสามารถยอมรับได้ สำหรับส่วนผสม M-2 ทั้งหมดมีค่ากำลังอัดสูงกว่ากำลังอัดเป้าหมายอยู่ในช่วงร้อยละ 7 ถึง 20

ค. คอนกรีตกำลังสูง – ส่วนผสม H-1 มี 1 ตัวอย่างที่มีกำลังอัดต่ำกว่าค่ากำลังอัดเป้าหมายอยู่ร้อยละ 7 ซึ่งยังสูงกว่าร้อยละ 85 ของกำลังอัดที่ทำการออกแบบ จึงสามารถยอมรับได้ และส่วนผสม H-2 ทั้งหมดมีกำลังอัดสูงกว่ากำลังอัดเป้าหมาย นอกจากนี้ส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงทั้งหมดมีกำลังอัดที่อายุ 1 วัน สูงกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังอัดที่ 28 วัน เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

จากการสังเกตพบว่ารูปแบบการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตไหล คอนกรีตหลา ที่อายุ 28 วันและคอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 1วัน มีลักษณะเป็นแบบการเฉือนเป็นรูปกรวย (Shear failure) หรือแบบผ่า (Splitting) หรือทั้งสองแบบผสมกันเป็นหลัก โดยไม่ปรากฏถึงแนวการวิบัติโดยแรงดึงเนื่องจากผลของการเยื้องศูนย์ของแรงอัด ซึ่งการวิบัติเกิดขึ้นที่บริเวณสัมผัสร่วมระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว ดังรูปที่ 4.9 สำหรับตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูง H-1 ที่อายุ 7 วัน ขึ้นไป และตัวอย่าง H-2 ที่อายุ 1 วันขึ้นไป มีลักษณะการวิบัติแบบเฉือนโดยแนวการวิบัติจะผ่านระนาบของมวลรวมหยาบและผิวของแนวการวิบัติมีลักษณะที่เรียบคมกว่า ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา Neville สามารถอธิบายได้ว่า ในคอนกรีตไหล และคอนกรีตหลา หรือคอนกรีตกำลังสูงที่ยังอายุน้อย ซีเมนต์เพสต์ยังคงมีความแข็งแรงต่ำและบริเวณสัมผัสร่วมระหว่างเพสต์ที่แข็งตัวกับมวลรวมหยาบจะเป็นบริเวณที่อ่อนแอ ดังนั้นการวิบัติจึงเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียกำลังของบริเวณดังกล่าวเรียกว่าเป็นการวิบัติเนื่องจากการยึดเหนี่ยว (Bond failure) แต่ในกรณีของคอนกรีตกำลังสูง ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวจะมีเนื้อแน่นและมีความแข็งแรงสูงมาก ซึ่งการรับแรงจะมีพฤติกรรมเป็นเนื้อเดียวมากขึ้น ในกรณีที่มวลรวมมีกำลังต่ำถึงปานกลาง การวิบัติที่เกิดขึ้นจะเป็นการวิบัติผ่านระนาบของมวลรวม (Transgranular failure)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติส่วนผสมตัวอย่างที่ทำการออกแบบ

ส่วนผสม	ประเภท	กำลังอัด* (Mpa) ที่อายุ (วัน)	ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด		อุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนสูงสุด (องศาเซลเซียส)	หมายเหตุ
			ค่ายุบตัวเริ่มต้น (ซม.)	ค่ายุบตัว/การไหลตัว		
F-1	คอนกรีตไหล	28.7 ที่ 28วัน	5.0 – 7.5	20-22.5/ 57 – 62.5	-	
F-2		43.7 ที่ 28 วัน	7.5 – 10.0	มากกว่า 25 มากกว่า 68	-	
M-1	คอนกรีตหลา	23.7 ที่ 28วัน	5.0 – 7.5	20-22.5/ 57-62.5	45	แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
M-2		33.7 ที่ 28 วัน	0 – 2.5	20-22.5/ 57-62.5	45	แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
H-1	คอนกรีตกำลังสูง	63.7 ที่ 28 วัน	2.5 – 5.0	22.5-25/ 52-57.5	-	
H-2		83.7 ที่ 28 วัน	–	22.5-25/ 52-57.5	-	

หมายเหตุ*

ค่ากำลังอัดเป้าหมาย = ค่ากำลังอัดที่ต้องการ + ส่วนเผื่อ ที่ค่าการยอมรับทางสถิติ 95% ตามมาตรฐาน ACI 214[66].

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวม

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	หิน 3 /4 นิ้ว	หิน 3/8 นิ้ว	ทราย
3 /4 นิ้ว	97.80	100.00	100.00
3 /8 นิ้ว	16.56	94.21	100.00
# 4	1.03	17.49	97.42
# 8	0.58	0.91	89.20
# 16	0.58	0.47	65.47
# 30	0.58	0.47	31.36
# 50	0.58	0.47	7.53
# 100	0.58	0.47	1.03

ตารางที่ 4.3 ขนาดคละของมวลรวมที่ได้จากการผสม และข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูง

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	ร้อยละที่ผ่านโดยน้ำหนัก (%)					
	หิน 20 มม. (35.76%)	หิน 10 มม. (20.56%)	ทราย (43.68%)	มวลรวมผสม	ขีดจำกัดล่าง	ขีดจำกัดบน
3 /4 นิ้ว	97.80	100.00	100.00	99.20	98.16	100.00
3 /8 นิ้ว	16.56	94.21	100.00	68.46	60.49	75.51
# 4	1.03	17.49	97.42	45.68	45.44	50.56
# 8	0.58	0.91	89.20	38.53	33.23	40.77
# 16	0.58	0.47	65.47	28.30	19.10	32.90
# 30	0.58	0.47	31.36	13.72	9.34	22.66
# 50	0.58	0.47	7.53	3.53	4.91	11.09
# 100	0.58	0.47	1.03	0.75	1.34	4.66

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทั่วไปของมวลรวมที่ใช้

คุณสมบัติ	หิน 3 /4 นิ้ว	หิน 3/8 นิ้ว	ทราย
ความถ่วงจำเพาะ (SSD)	2.69	2.69	2.59
ความถ่วงจำเพาะ (DRY)	2.68	2.68	2.57
ค่าการดูดซึม	0.35	0.35	0.95

ตารางที่ 4.5 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด

คุณสมบัติ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3		ตัวอย่างที่ 4		ค่าเฉลี่ย	
	หิน	ทราย	หิน	ทราย	หิน	ทราย	หิน	ทราย	หิน	ทราย
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	1548	1576	1509	1590	1559	1597	1500	1572	1529	1584
ปริมาณช่องว่าง (%)	42.23	38.67	43.67	38.12	41.84	37.87	44.02	38.85	42.94	38.38

ตารางที่ 4.6 หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวมตามสัดส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบ

คุณสมบัติ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ค่าเฉลี่ย
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	1905	1892	1915	1910	1906
ปริมาณช่องว่าง (%)	27.84	28.33	27.46	27.65	27.82

ตารางที่ 4.7 ส่วนผสมที่ได้จากการคำนวณออกแบบและผลการทดสอบ (วัสดุผสมต่อลูกบาศก์เมตร)

ส่วนผสม	คอนกรีตไหล		คอนกรีตหลา		คอนกรีตกำลังสูง	
	H-1	H-2	M-1	M-2	H-1	H-2
ซีเมนต์ (กก.)	330	435	255	275	525	535
เถ้าลอย (กก.)	-	-	49	52.5	-	-
น้ำ (กก.)	189	191	197	175	169	126
หิน 20 มม. (กก.) (SSD)	660	626	654	667	630	668
หิน 10 มม. (กก.) (SSD)	380	360	376	384	362	384
ทราย (กก.) (SSD)	776	736	769	785	740	785
HRWR (ซีซี)	3300	3915	3037	4257	5775	10700
%HRWR	1.0	0.9	1.0	1.3	1.1	2.0
S/A	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
W/C+P	0.57	0.44	0.65	0.54	0.32	0.24
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	2,335	2,348	2,300	2,338	2,426	2,498

ตารางที่ 4.8 วิธีการออกแบบมาตรฐานที่นำมาใช้เปรียบเทียบ

วิธีการออกแบบ	คอนกรีตไหล		คอนกรีตหลา		คอนกรีตกำลังสูง	
	ส่วนผสม F-1	ส่วนผสม F-2	ส่วนผสม M-1	ส่วนผสม M-2	ส่วนผสม H-1	ส่วนผสม H-2
ACI 211.1-91	O	O				
ACI 211.4R-93		O	O	O	O	O
DOE	O	O			O	O
Road Note No.4	O	O				

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบส่วนผสมของคอนกรีตจากการออกแบบกับวิธีแบบดั้งเดิม

วัสดุผสม (กก./ลบ.ม.)	คอนกรีตไหล									คอนกรีตหลา				คอนกรีตกำลังสูง					
	ส่วนผสม F-1				ส่วนผสม F-2					ส่วนผสม M-1		ส่วนผสม M-2		ส่วนผสม H-1			ส่วนผสม H-2		
	ACI 211.1	DOE	ROAD NOTE	งานวิจัย	ACI 211.1	ACI 211.4	DOE	ROAD NOTE	งานวิจัย	ACI 211.4	งานวิจัย	ACI 211.4	งานวิจัย	ACI 211.4	DOE	งานวิจัย	ACI 211.4	DOE	งานวิจัย
ซีเมนต์	345	305	395	330	524	404	420	540	435	263	255	316	275	554	524	525	732	503	535
เถ้าลอย	-	-	-	-	-	-	-	-	-		49		53	-	-	-	-	-	-
น้ำ	190	191	197	189	205	194	196	216	191	189	197	183	175	183	174	169	183	139	126
หิน (SSD)	934	1028	991	1040	934	1273	993	893	986	1370	1030	1349	1051	1203	1110	992	1093	1267	1052
ทราย (SSD)	874	874	747	776	686	478	784	673	736	514	769	506	785	451	620	740	410	571	785
S/A	0.48	0.46	0.43	0.43	0.42	0.27	0.44	0.43	0.43	0.27	0.43	0.27	0.43	0.27	0.36	0.43	0.27	0.31	0.43
W/C+P	0.55	0.63	0.50	0.57	0.39	0.48	0.47	0.40	0.44	0.72	0.65	0.58	0.54	0.33	0.33	0.32	0.25	0.28	0.24
A/C+P	5.24	6.23	4.40	5.50	3.07	4.33	4.23	2.90	3.96	7.16	5.92	5.87	5.60	2.99	3.30	3.30	2.05	3.65	3.43
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	2343	2398	2330	2335	2349	2349	2393	2322	2348	2336	2300	2354	2338	2391	2428	2426	2418	2480	2498
ค่ายุบตัว (ซม.)	2.5-5.0	5.0	2.5-5.0	5.0-7.5	7.5-10.0	7.5-10.0	7.5	5.0-10.0	7.5-10.0	5.0-7.5	5.0-7.5	2.5-5.0	0-2.5	2.5-5.0	2.5	2.5-5.0	2.5-5.0	0	0-2.5
กำลังอัด (Mpa) ที่อายุ 28 วัน*	28.7	28.7	28.7	28.7	43.7	43.7	43.7	43.7	43.7	23.7	23.7	33.7	33.7	63.7	63.7	63.7	83.7	83.7	83.7

หมายเหตุ : ค่ากำลังอัดเป้าหมาย อ้างอิงจากตัวอย่างทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C33

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) การเปรียบเทียบส่วนผสมของคอนกรีตจากการออกแบบกับวิธีแบบดั้งเดิม

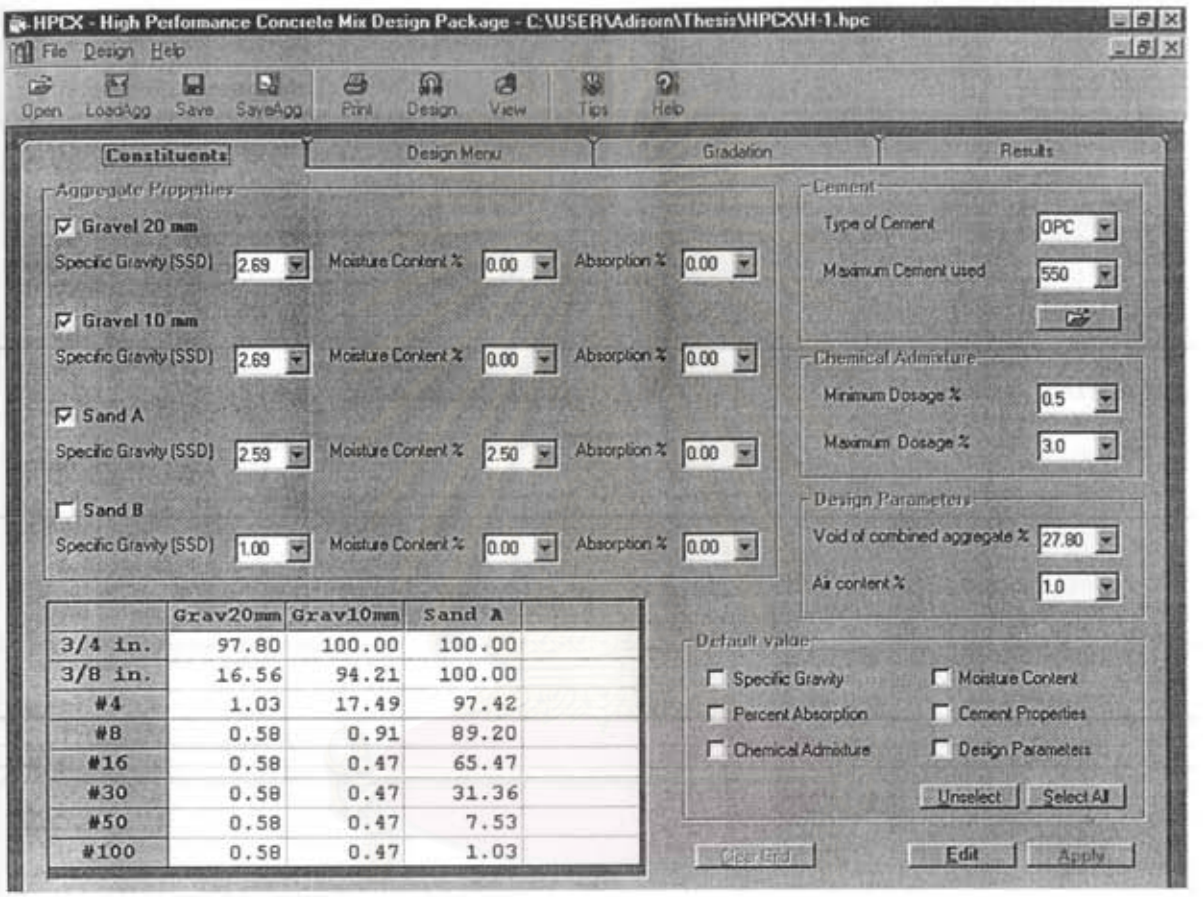
วัสดุผสม (กก./ลบ.ม.)	คอนกรีตไหล									คอนกรีตหลา				คอนกรีตกำลังสูง					
	ส่วนผสม I-1				ส่วนผสม I-2					ส่วนผสม II-1		ส่วนผสม II-2		ส่วนผสม III-1			ส่วนผสม III-2		
	ACI 211.1	DOE	ROAD NOTE	งานวิจัย	ACI 211.1	ACI 211.4	DOE	ROAD NOTE	งานวิจัย	ACI 211.4	งานวิจัย	ACI 211.4	งานวิจัย	ACI 211.4	DOE	งานวิจัย	ACI 211.4	DOE	งานวิจัย
วัสดุประสาน	1.05	0.92	1.20	1.00	1.20	0.93	0.97	1.24	1.00	0.87	1.00	0.96	1.00	1.06	1.00	1.00	1.37	0.94	1.00
น้ำ	1.01	1.01	1.04	1.00	1.07	1.02	1.03	1.13	1.00	0.96	1.00	1.05	1.00	1.08	1.03	1.00	1.45	1.10	1.00
หิน (SSD)	0.90	0.99	0.95	1.00	0.95	1.29	1.01	0.91	1.00	1.33	1.00	1.28	1.00	1.21	1.12	1.00	1.04	1.20	1.00
ทราย (SSD)	1.13	1.13	0.96	1.00	0.93	0.65	1.07	0.91	1.00	0.67	1.00	0.64	1.00	0.61	0.84	1.00	0.52	0.73	1.00
S/A	1.12	1.07	1.00	1.00	0.98	0.63	1.02	1.00	1.00	0.63	1.00	0.63	1.00	0.63	0.84	1.00	0.63	0.72	1.00
W/C+P	0.96	1.11	0.88	1.00	0.89	1.09	1.07	0.91	1.00	1.11	1.00	1.07	1.00	1.03	1.03	1.00	1.04	1.17	1.00
A/C+P	0.95	1.13	0.80	1.00	0.78	1.09	1.07	0.73	1.00	1.21	1.00	1.05	1.00	0.91	1.00	1.00	0.6	1.06	1.00
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02	0.99	1.00	1.02	1.00	1.01	1.00	0.99	1.00	1.00	0.97	0.99	1.00
ค่ายุบตัว (ซม.)	2.5-5.0	5.0	2.5-5.0	5.0-7.5	7.5-10.0	7.5-10.0	7.5	5.0-10.0	7.5-10.0	5.0-7.5	5.0-7.5	2.5-5.0	0-2.5	2.5-5.0	2.5	2.5-5.0	2.5-5.0	0	0-2.5
กำลังอัด (Mpa) ที่อายุ 28 วัน	28.7	28.7	28.7	28.7	43.7	43.7	43.7	43.7	43.7	23.7	23.7	33.7	33.7	63.7	63.7	63.7	83.7	83.7	83.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบคุณสมบัติหลักของตัวอย่างส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง

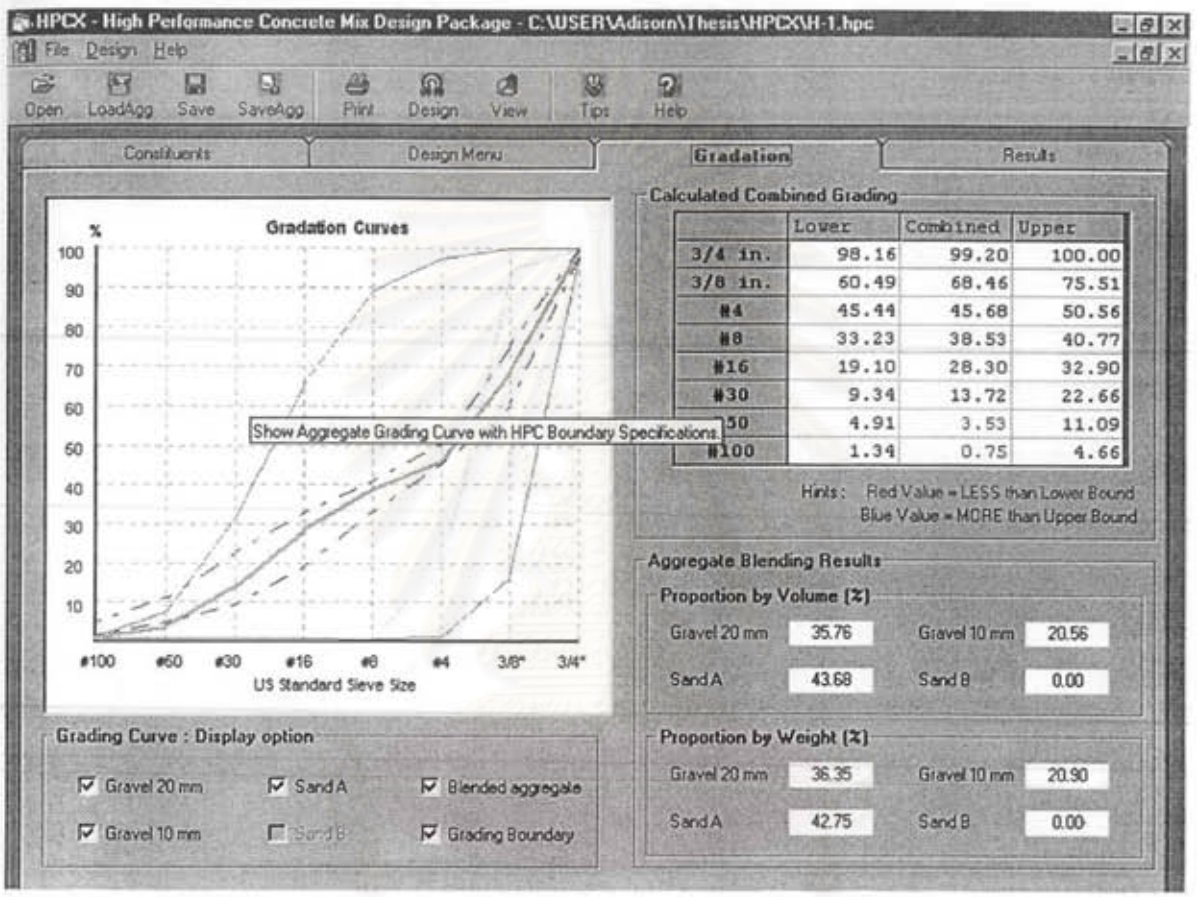
ส่วนผสม	ค่ายุบตัวเริ่มต้น (ซม.)		ค่ายุบตัว (ซม.)		ค่าการไหลตัว (ซม.)						
	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	ทดสอบ	ออกแบบ	1 วัน	7 วัน	28 วัน	ออกแบบ	อายุ
F-1	4.0	5.0-7.5	20.5	20-22.5	60.0	57-62.5	-	-	41.7 39.6 38.6	28.7	28
F-2	4.5	7.5-10.0	26.0	> 25.0	65.0	> 68	-	-	38.5 48.4 48.4	43.7	28
M-1	10.0	5.0-7.5	22.0	20-22.5	65.0	57-62.5	-	-	23.8 21.5 20.3	23.7	28
M-2	2.0	0-2.5	21.0	20-22.5	60.0	57-62.5	-	-	40.7 36.2 38.5	33.7	28
H-1	-	2.5-5.0	23.0	22.5-25.0	58.0	52-57.5	32.3 34.5 33.9	50.2 48.8 59.8	64.3 66.2 59.2	63.7	28
H-2	-	-	22.5	22.5-25.0	55.0	52-57.5	57.1 58.4 59.8	63.8 67.1 63.9	88.6 87.0 85.2	83.7	28

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



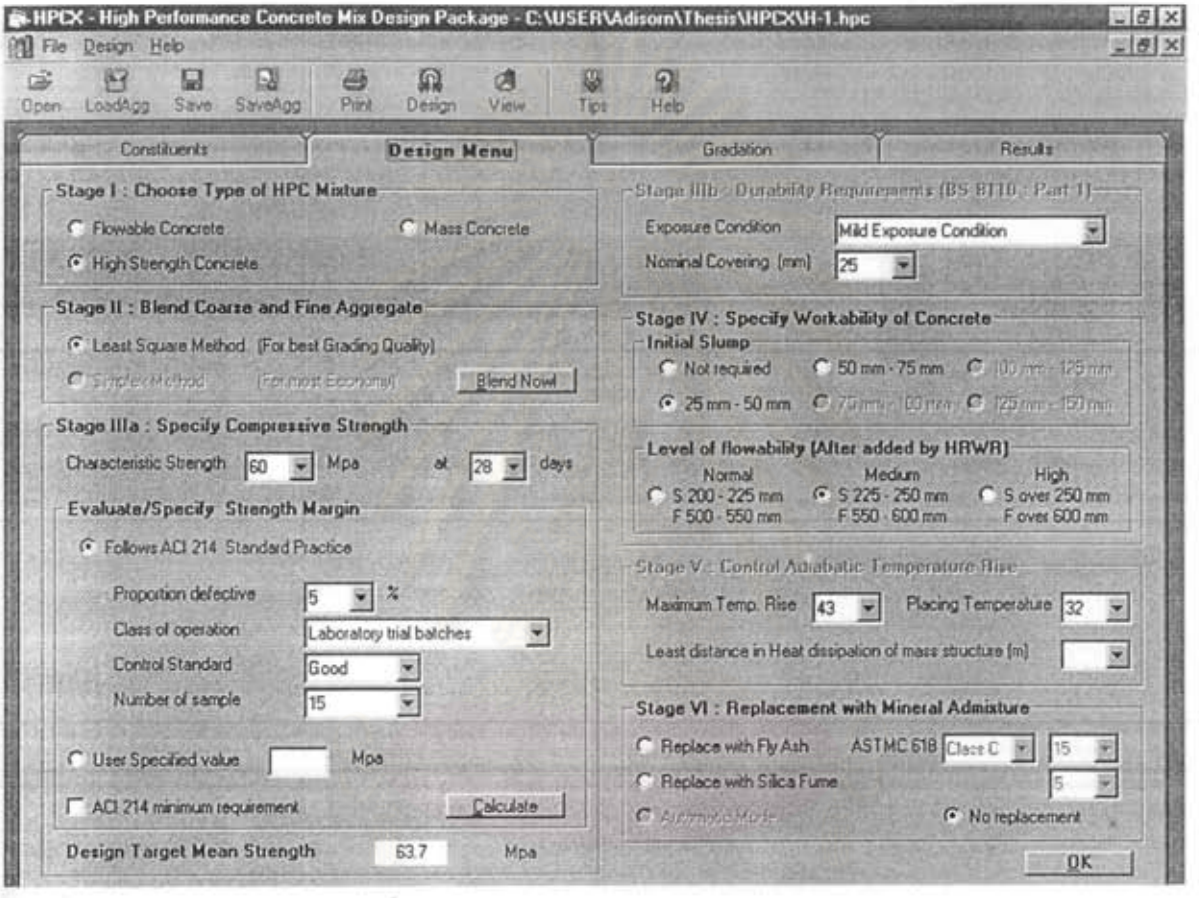
รูปที่ 4.1 หน้าต่างแสดงข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุผสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



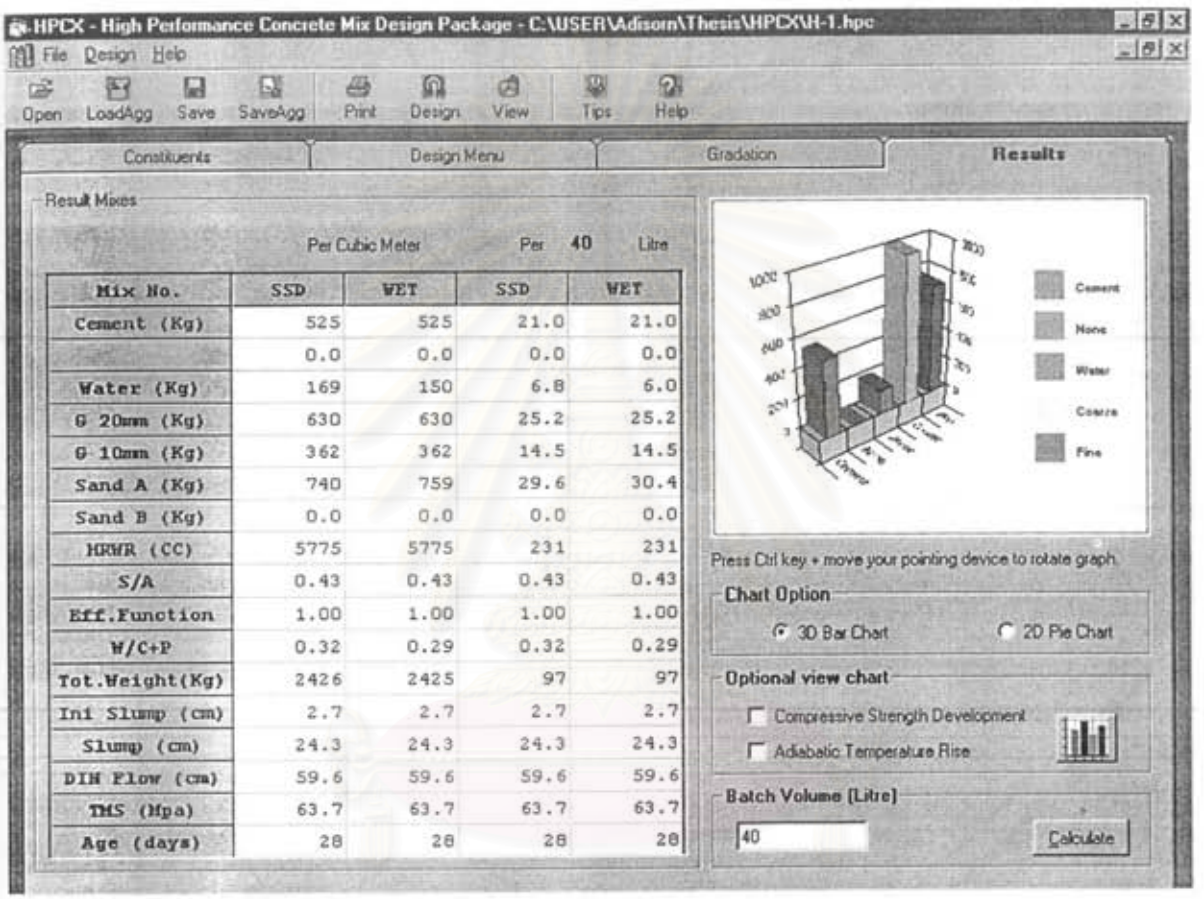
รูปที่ 4.2 สัดส่วนผสมของมวลรวมและขนาดคละ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



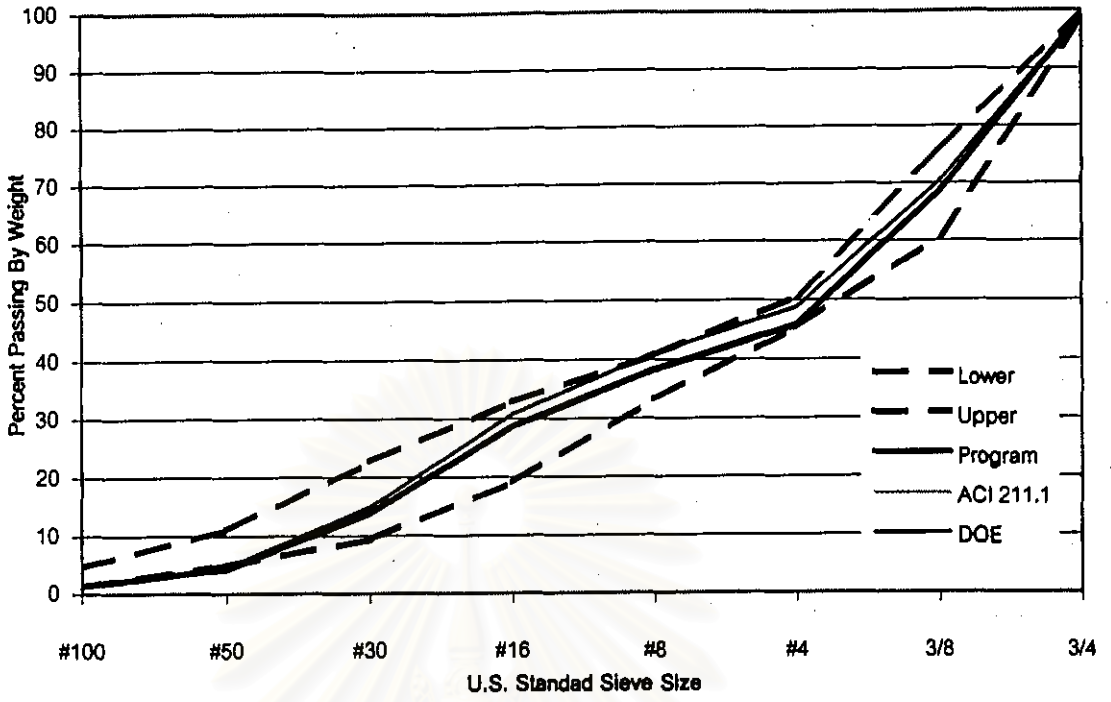
รูปที่ 4.3 หน้าต่างแสดงการคำนวณออกแบบสำหรับส่วนผสม H-1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

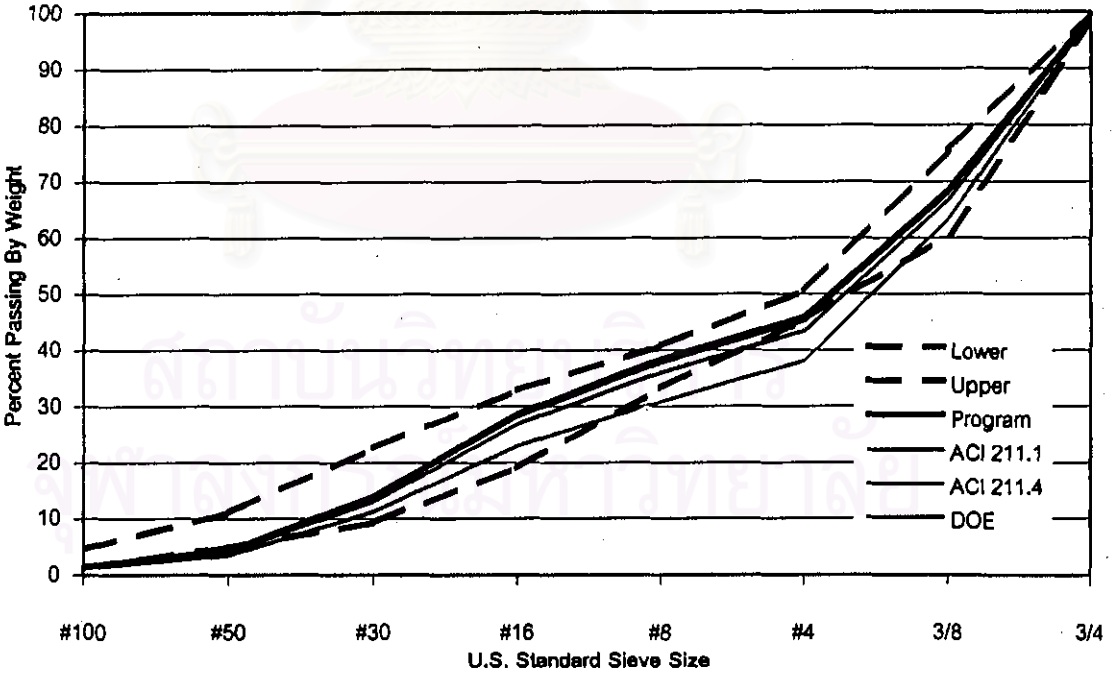


รูปที่ 4.4 ส่วนผสม H-1 จากการคำนวณออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

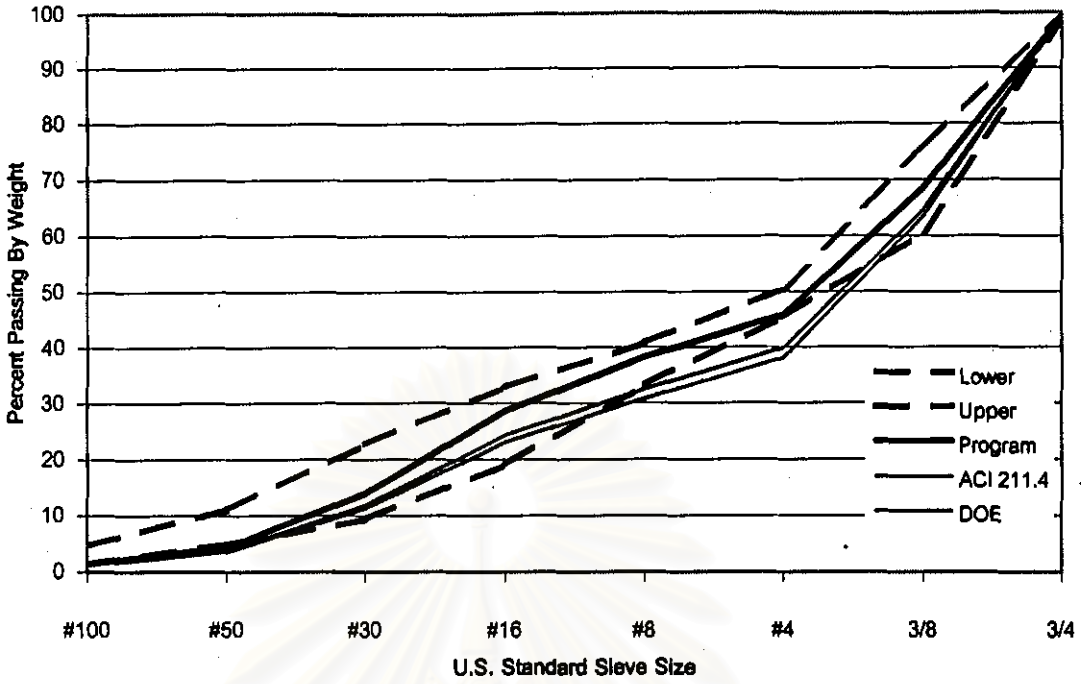
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



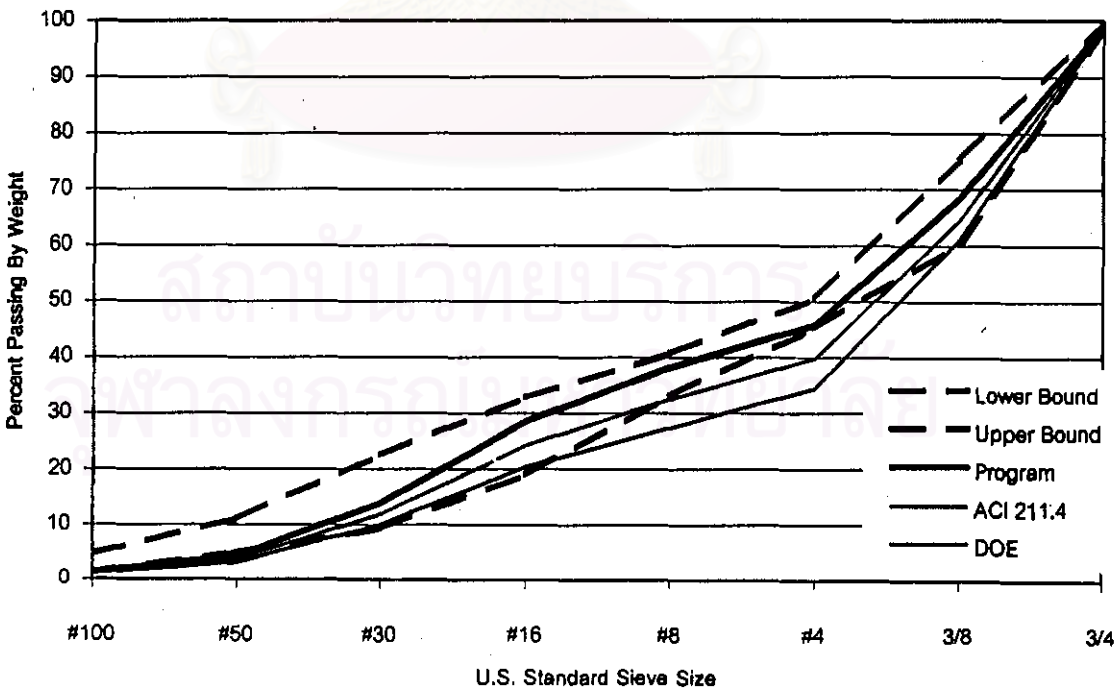
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบกราฟขนาดคละของมวลรวมของส่วนผสม F- 1 ด้วยวิธีการออกแบบต่าง ๆ



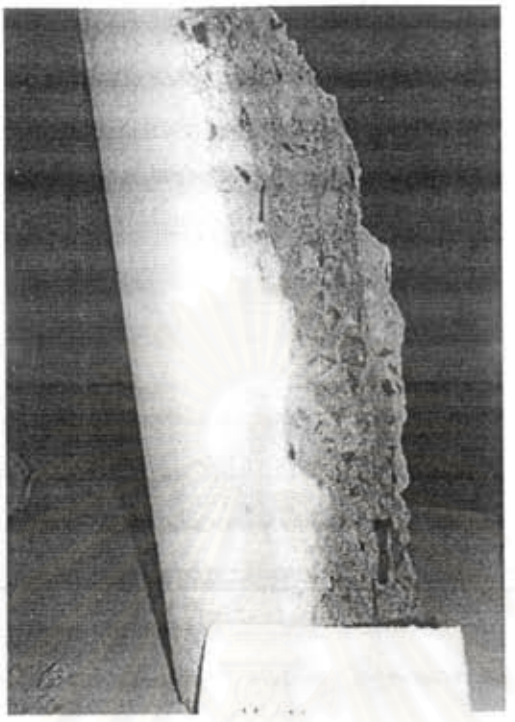
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบกราฟขนาดคละของมวลรวมของส่วนผสม F- 2 ด้วยวิธีการออกแบบต่าง ๆ



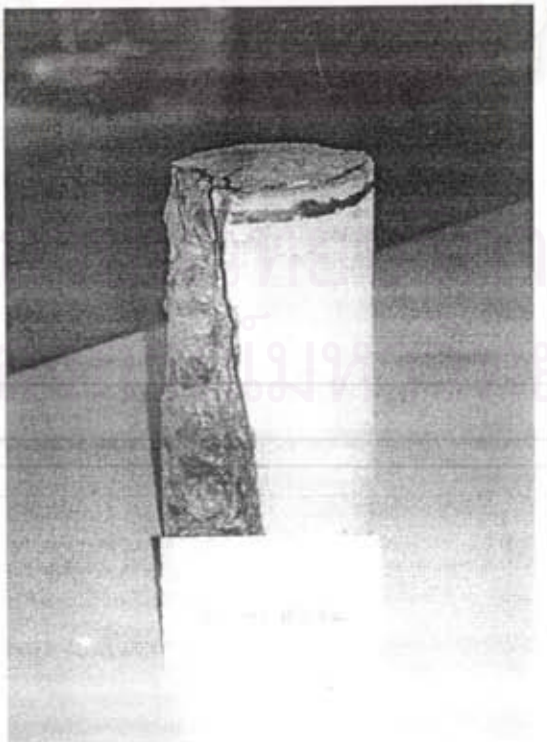
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบกราฟขนาดคละของมวลรวมของส่วนผสม H- 1 ด้วยวิธีการออกแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบกราฟขนาดคละของมวลรวมของส่วนผสม H- 1 ด้วยวิธีการออกแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.9 แสดงการวิบัติของคอนกรีตกำลังต่ำที่รับแรงอัดในแนวแกน



รูปที่ 4.10 แสดงการวิบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่รับแรงในแนวแกน