บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 ทั่วไป

การพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ทั้งทางเทคนิค และการออกแบบส่วนผสม ได้มีการปรับปรุงเพื่อให้เกิดความเหมาะสมที่สามารถประกันคุณสมบัติได้ งานวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตสมรรถนะสูงในประเทศไทยเริ่มจากงานวิจัยที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่ปริมาณซีเมนต์อยู่ระหว่าง 350-600 กก./ลบ.ม. สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ระหว่าง 0.26 ถึง 0.32 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพิ่มความไหลลื่นและความสามารถเทได้ ต่อมาได้วิจัยเชิงประยุกต์ในงานโครงสร้าง เช่น โครงสร้างคอนกรีตอัดแรง โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เสา และกำลังรับแรงเฉือน เป็นต้น การวิจัยได้ขยายวงเข้าสู่ขบวนการผลิต โดยค่อย ๆ วิวัฒนาการสู่คอนกรีตสมรรถนะสูงที่สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางในการก่อสร้าง ได้เสนอแนวทางการปรับปรุงขนาดคละของมวลรวมให้เกิดความสามารถทำงานได้สูง และมีกำลังอัดสูง ที่สามารถใช้งานจริงในอุตสาหกรรม เป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นในการผลิตทั้งในสภาวะเหลว สภาวะแข็งตัว และสภาวะใช้งานจริง อนึ่งในการใช้สารปอซโซลานด้วยเถ้าลอย และซิลิก้าฟูม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทั้งในสภาวะเหลว และสภาวะแข็งตัวของคอนกรีต ได้มีการวิจัยในการปรับความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตด้วยเถ้าลอย พบว่า ในทุก ๆ 10 % การทดแทนซีเมนต์ สามารถลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ได้ถึง 0.03 ที่ยังคงความสามารถทำงานได้ไว้ การศึกษาถึงพฤติกรรมทางเคมีของเถ้าลอยใน ปฏิกิริยาปอซโซลานิกด้วยการวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิตี (Thermogravity Analysis) ให้เน้นผลอันดับสองของเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังตามอายุ จึงพบว่าเป็นไปตามปริมาณเถ้าลอย ทั้งนี้ยังพบว่าสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม่ควรเกิน 35% โดยน้ำหนัก ในทำนองเดียวกันการวิจัยการใช้ซิลิก้าฟูมในส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง พบว่าการใช้ซิลิก้าฟูมเพิ่มในซีเมนต์ทุก ๆ 15% โดยน้ำหนักจะสามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วันได้สูงถึง 140% ของคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้ซิลิก้าฟูม แต่จะมีผลทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตลดลง

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงด้วยการเน้นขนาดคละของมวลรวม และการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารเคมีสมเพิ่มร่วมกับการที่สามารถประกันคุณสมบัติตามสภาวะการณ์ ด้วยองค์ความรู้ที่สะสมจากงานวิจัยที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผนวกกับกรรมวิธีการผลิตในอุตสาหกรรม และเทคนิคการออกแบบในระดับสากลเป็นพื้นฐาน ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบต่าง ๆ แล้วสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ควบคุมคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง แล้วนำไปพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง เพื่อสามารถประกันคุณสมบัติทั้งในสภาวะเหลว และสภาวะแข็งตัว โดยมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมคอนกรีตใน 3 ประเภท คือ คอนกรีตไหล คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตหลา

ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งสามประเภท เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสม ภายใต้กรอบของคอนกรีตสมรรถนะสูงก่อน แล้วจึงหาสัดส่วนคละของมวลรวมโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลอง จากนั้นสามารถหาปริมาณซีเมนต์ และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้สอดคล้องกับกำลังอัดและข้อกำหนดด้านความทนทาน รวมทั้งการตรวจสอบความสามารถเทได้จากค่ายุบตัวเริ่มต้นตามหลักการน้ำอิสระ แล้วปรับแต่งคุณสมบัติในสภาวะเหลวด้วยสารลดน้ำพิเศษ ขั้นตอนต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตรวจสอบควบคุมคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมตามรายการที่กำหนดใน ACI 211 ได้แก่ มวลรวมตามมาตรฐาน มอก.566 หรือ ASTM C33 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก.15 หรือ ASTM C150 น้ำผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน มอก.213 หรือ ASTM C94 สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ได้แก่ สารลดน้ำอย่างมาก ตามมาตรฐาน มอก.733 หรือ ASTM C494 สารผสมเพิ่มประเภทปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 สำหรับเถ้าลอย และ ASTM C1240 สำหรับซิลิก้าฟูม

2. หาสัดส่วนมวลรวมให้ได้ขนาดคละในกรอบข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยวิธีการ Least square ปรับเพิ่ม-ลด สัดส่วนของมวลรวมแต่ละชนิดอย่างเป็นระบบ ให้ค่าเบี่ยงเบนของอัตราผ่านตะแกรงมาตรฐานน้อยที่สุด หากขนาดคละมวลรวมไม่ดีพอต้องปรับแก้โดยมวลรวมกลุ่มพิเศษ ซึ่งพิจารณาได้จากค่าเบี่ยงเบนของอัตราผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดต่าง ๆ ของมวลรวม ซึ่งจะแสดงผลโดยโปรแกรม แล้วดำเนินการคำนวณโดย *Least square* อีกครั้งจนได้มวลรวมที่มีขนาดคละภายใต้กรอบข้อกำหนด โดยโปรแกรมสามารถรองรับต่อการใช้งานมวลรวมที่มีขนาดคละต่างกันได้ 4 ประเภท

3. หาสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์จาก ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ 28 วันกับสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ด้วยโมเดลซึ่งพัฒนาจากผลการทดสอบที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับข้อมูลจาก ACI 211 และกำหนดปริมาณซีเมนต์เริ่มต้นโดยยึดถือปริมาณซีเมนต์ขั้นต่ำตามข้อกำหนดว่าด้วยความทนทานตามมาตรฐานของ CEB MC90 และ BS 8110 โดยมีการปรับแก้ตาม Maturity Concept เพื่อรับประกันกำลังอัดที่ 24 ชั่วโมง

4. จากสัดส่วนคละของมวลรวม สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณซีเมนต์ที่กำหนด สามารถคำนวณปริมาณน้ำ และส่วนผสมทั้งหมดได้ แล้วนำมาตรวจสอบค่าการยุบตัวเริ่มต้นโดยหลักการน้ำอิสระ ซึ่งจะทำนายค่ายุบตัวของส่วนผสม หากยังไม่ถึงเกณฑ์กำหนดจะกลับไปในขั้นตอนที่ 3 เพื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ และคำนวณส่วนผสมทั้งหมดใหม่ จนได้น้ำอิสระเพียงพอต่อการยุบตัวเริ่มต้นตามที่กำหนด

5. คำนวณปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มแบบสารลดน้ำพิเศษ เพื่อปรับปรุงความสามารถเทได้ และการไหลของคอนกรีต ด้วยโมเดลที่พัฒนาจากหลักการน้ำอิสระดั้งเดิม โดยอนุมานให้สารเคมีผสมเพิ่มทำหน้าที่เสมือนน้ำอิสระเพิ่มเติม และมีผลต่อการเพิ่มความไหลลื่นของส่วนผสม ปริมาณการใช้งานจะกำหนดโดยปริมาณน้ำอิสระที่ต้องการเพิ่มเติมในส่วนผสมเพื่อให้เกิดการยุบตัว หรือการไหลตัวตามข้อกำหนด อนึ่งปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้จะอยู่ภายใต้กรอบคำแนะนำในการใช้งานของผู้ผลิต เพื่อป้องกันผลข้างเคียงจากการใช้งาน ได้แก่ การหน่วงการก่อตัวมากเกินไป ผลต่อปริมาณอากาศ และกำลังอัด เป็นต้น

นอกเหนือจากกระบวนการหลักในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง การศึกษาวิจัยนี้ได้พิจารณาเอกลักษณ์เฉพาะตัวตามคุณสมบัติหลักที่ต้องการควบคุม ของคอนกรีตไหล คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตหลา สรุปได้ดังนี้

5.2 คอนกรีตไหล

1. คอนกรีตไหลจัดให้เป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงชนิดที่มีระดับการไหลมาก (Flow) ถึง การไหลมากพิเศษ (Super Flow) โดยกำหนดจากค่าการยุบตัว และการไหลตัวด้วยการทดสอบโต๊ะการไหล โดยที่การยุบตัว 20 – 25 ซม. และการไหล 55 - 65 ซม. สำหรับคอนกรีตไหลมาก และค่าการยุบตัวมากกว่า 25 ซม. และการไหลเกินกว่า 65 ซม. สำหรับคอนกรีตไหลมากพิเศษ ทั้งนี้กำลังอัดที่ 28 วัน ในการออกแบบไม่น้อยกว่า 200 กก./ตร.ซม. หรือตามข้อกำหนดด้านความทนทาน

2. คอนกรีตไหลจะขจัดการแยกตัวด้วยการควบคุมระดับการยุบตัวเริ่มต้นของส่วนผสม แล้วใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์บางส่วนเพื่อเพิ่มการไหลลื่นของเนื้อเพสต์ ลดการยึดเกาะ และลดการเยิ้มของส่วนผสม การออกแบบยังจะต้องได้ควบคุมปริมาณเพสต์อิสระไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของปริมาตรช่องว่างของมวลรวม หรือปริมาณเพสต์รวมจะต้องไม่น้อยกว่า 325 ลิตร/ลบ.ม.ของคอนกรีต เพื่อเพิ่มการเคลือบผิวมวลรวม ลดความเสียดทานในการไหลตัวของคอนกรีต ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมพบว่าควรอยู่ระหว่าง 15 - 35 % โดยน้ำหนักของปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม

5.3 คอนกรีตกำลังสูง

1. การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง เน้นการลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงให้ต่ำ และให้ปริมาณน้ำอิสระเหลือน้อยที่สุด แล้วพิจารณาประสิทธิผลของสารลดน้ำพิเศษในการเพิ่มความไหลลื่น เพิ่มความสามารถทำงานได้การออกแบบส่วนผสมในงานวิจัยนี้ ครอบคลุมกำลังอัดระหว่าง 600 ถึง 850 กก./ตร.ซม. ที่สามารถประกันผลได้ โดยมีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.34 ถึง 0.23 และปริมาณซีเมนต์ไม่เกิน 550 กก./ลบ.ม.

2. การเพิ่มซิลิก้าฟูมในส่วนผสม จะทำให้กำลังอัดพัฒนาสูงขึ้นได้ทั้งในระยะต้น และระยะปลาย จากการวิจัยพบว่าจะต้องควบคุมปริมาณซิลิก้าฟูมไว้ไม่เกินร้อยละ 15 ของปริมาณซีเมนต์ เพื่อควบคุมความสามารถเทได้ตามมาตรฐานของคอนกรีตสมรรถนะสูง การคำนวณโดยใช้ Efffective Cement Concept กำหนดปริมาณการใช้ซิลิก้าฟูมที่เหมาะสมตามกำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบ

3. การประกันผลในการพัฒนากำลังอัดที่ 24 ชั่วโมง ใช้หลักการของ Maturity Concept หาความสัมพันธ์เกี่ยวกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และควบคุมสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้สอดคล้องกับประเภทของซีเมนต์ และอุณหภูมิขณะบ่มคอนกรีต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 คอนกรีตหลา

1. อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตหลา เป็นผลมาจากปริมาณซีเมนต์ และองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ อันประกอบด้วย C_3S (ไตรแคลเซียมซิลิเกต) และ C_3A (ไตรแคลเซียมอลูมิเนต) ที่มีผลในช่วงแรก และองค์ประกอบอื่น ๆ จะส่งผลในช่วงถัดมา การควบคุมปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิเพิ่มจากการทดสอบแบบกักกันความร้อน อัตราการเทคอนกรีต ปริมาตร ขนาด และมิติของคอนกรีตหลา

2. การควบคุมปริมาณความร้อนช่วงแรกจาก C_3S และ C_3A สามารถใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์บางส่วนโดยใช้วิธีการ Effective Cement Concept เพื่อหาปริมาณเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการควบคุมความร้อนโดยไม่ให้เสียผลการไหล และกำลังอัด จากการวิจัยพบว่า ปริมาณที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 15-35 %

3. อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดภายใต้พิกัดควบคุมการแตกร้าวจากปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำตามข้อกำหนดของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.1007-34 หรือ วสท.1008-38) หรือ ACI 318-95[58] อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส การออกแบบส่วนผสมจากปริมาตร ขนาด และมิติ ของโครงสร้าง และอัตราการเทคอนกรีต จะสามารถควบคุมอุณหภูมิเพิ่มให้อยู่ในพิกัดได้ ทั้งนี้พบว่าผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนจะต้องมีการปรับแก้ด้วยตัวคูณเท่ากับ 1.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย