บทที่ 1

บทนำ

1.1 ทั่วไป

ความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีการก่อสร้างในสภาวะการแข่งขันทางธุรกิจช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้นำไปสู่ความต้องการใช้งานวัสดุก่อสร้างที่มีคุณภาพสูง โดยเฉพาะคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างหลักที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุดอย่างหนึ่งซึ่งได้มีการพัฒนาคุณสมบัติให้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อสนองตอบความต้องการในรูปแบบต่าง ๆ คอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นคอนกรีตคุณภาพสูงซึ่งถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทดแทนศักยภาพที่ขาดหายไปจากการใช้งานคอนกรีตแบบดั้งเดิมในส่วนของความสามารถทำงานได้เพื่อลดแรงงานในการเทหรือจี้เขย่า ขจัดคอนกรีตเป็นโพรงหรือแยกตัว งานโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมหนาแน่นหรือมีรูปร่างหน้าตัดที่ซับซ้อน อนึ่งในงานโครงสร้างสำคัญซึ่งต้องการความทนทานสูง เช่น งานโครงสร้างบริเวณชายฝั่งที่มีความชื้นสูง และต้องเผชิญกับสภาวะอากาศรุนแรงจึงต้องการคอนกรีตที่กำลังอัดสูง และมีความทนทานสูงด้วย ในโครงสร้างช่วงยาวมีความจำเป็นต้องลดขนาดของชิ้นส่วน มีสติฟเนสสูง ลดการคืบตัวและการหดตัว จึงต้องการคอนกรีตที่มีกำลังสูง นอกจากนี้ในการก่อสร้างบางประเภทยังต้องการคอนกรีตที่มีการพัฒนากำลังอัดเริ่มแรกสูง เช่น งานซ่อมแซมในภาวะเร่งด่วนของผิวจราจร พื้นสนามบิน หรือการก่อสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปบางอย่าง รวมไปถึงโครงสร้างคอนกรีตหลาที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิภายในเพื่อลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิกับสภาวะภายนอกโดยรอบ

แม้ว่าปัจจุบันการใช้งานคอนกรีตสมรรถนะสูงในเชิงพาณิชย์จะเป็นไปอย่างแพร่หลายในระดับหนึ่งแล้ว แต่ยังขาดมาตรฐานการออกแบบส่วนผสมจึงคงต้องใช้วิธีการออกแบบดั้งเดิม ผนวกกับความจำเป็นเกี่ยวกับความรู้ความเข้าใจอย่างละเอียดอ่อนในคอนกรีตสมรรถนะสูง การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงจึงยังคงอาศัยการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือในสนามเป็นสำคัญ จึงเป็นการยากลำบากต่อการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง ดังนั้นการกระจายความรู้เกี่ยวกับการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงสู่อุตสาหกรรมจะเป็นการเพิ่มศักยภาพของการผลิต และการใช้คอนกรีตสมรรถนะสูงในประเทศ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยให้การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงเกิดความสะดวกยิ่งขึ้น โดยศึกษาแนวทางออกแบบที่พิจารณาถึงปัจจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุผสมที่สอดคล้องกับขบวนการปกติในอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ และมุ่งเน้นคุณสมบัติเด่นของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่เกี่ยวข้องกับการไหล กำลังสูง และการควบคุมอุณหภูมิได้

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 คอนกรีตสมรรถนะสูง

การพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงในระยะแรก[1] มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อความทนทาน และความปลอดภัยในการให้บริการ ได้แก่ โครงสร้างอาคารบรรจุนิวเคลียร์ โครงสร้างนอกชายฝั่งทะเล โครงสร้างอุโมงค์ หรือโครงสร้างพิเศษที่ต้องการคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงพิเศษ เป็นต้น ต่อมาเมื่อคุณสมบัติพิเศษของคอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นที่ยอมรับ และผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมีศักยภาพในการผลิตและควบคุมคุณภาพได้ดี การใช้งานคอนกรีตสมรรถนะสูงจึงแพร่หลายมากขึ้น โครงสร้างหลักจึงเป็นคอนกรีตที่มีคุณภาพสูงขึ้น วิธีการพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นที่ยอมรับตลอดมาในการใช้วัสดุผสมและกรรมวิธีการผลิตดั้งเดิมด้วยการลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำลง แล้วใช้สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษ ตามมาตรฐาน ASTM ชนิด F หรือ G หรือวัสดุปอซโซลานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทั้งในสภาวะเหลว และสภาวะที่แข็งตัวของคอนกรีตให้เป็นไปตามข้อกำหนด

สำหรับประเทศไทย[2] การใช้งานคอนกรีตสมรรถนะสูงมีจุดเริ่มจากคอนกรีตความสามารถทำงานได้สูง ในงานเทคอนกรีตด้วยเทคนิคพิเศษ เช่น งานเทเข็มเจาะด้วยวิธีทริมมี ซึ่งต้องการคอนกรีตที่มีความสามารถทำงานได้สูงและไม่เกิดการแยกตัว ในขณะที่มีกำลังอัดไม่สูงนัก คอนกรีตประเภทนี้จะถูกออกแบบให้มีค่ายุบตัว 15 ถึง 20 เซนติเมตร โดยใช้สารลดน้ำแบบดั้งเดิมและสารหน่วงการก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM ชนิด A และ D เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสม และยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต และด้วยส่วนผสมที่มีความเหลวสูงนี้จะต้องทำการเพิ่มส่วนละเอียดให้สูงกว่าปกติเพื่อให้ส่วนผสมคอนกรีตที่ได้มีการยึดเกาะตัวกันดีขึ้น เมื่อพิจารณาจะพบว่าส่วนผสมสำหรับเทเข็มเจาะนี้มีปริมาณซีเมนต์ค่อนข้างสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากประสิทธิภาพของสารลดน้ำแบบธรรมดายังไม่สูงนัก กล่าวคือสามารถลดน้ำได้เพียง 10 – 15 % เท่านั้น และต้องควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อป้องกันการแยกตัวด้วย โดยต่อมางานวิจัยได้มุ่งพัฒนาคอนกรีตกำลังอัดสูงโดย สุพรรณ[3] ทดลองผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยใช้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.26 – 0.32 ด้วยปริมาณซีเมนต์ 550 กก./ลบ.ม. และใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีส่วนผสมของแบลคลิกเกอร์เพื่อปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงสุดได้ 866 และ 909 กก./ตร.ซม. ในกรณีที่มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มและไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มตามลำดับ การศึกษาของ สกุล[4] ได้ใช้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.23 – 0.40 และปริมาณซีเมนต์ระหว่าง 350 – 600 กก./ลบ.ม. โดยใช้สารลดน้ำพิเศษที่มีส่วนประกอบของลิกโนซัลโฟเนต และแนพธาลีน โดยใช้หินที่มีขนาดโตสุดระบุเท่ากับ 1/2 นิ้ว อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม 0.33 – 0.40 สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงถึง 115 Mpa ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตได้ในระยะแรกนี้มีความสามารถทำงานได้ต่ำ เนื่องจากการลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงประกอบกับสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ยังมีประสิทธิภาพในการลดน้ำไม่มากนัก นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตได้มีการสูญเสียความสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในสภาพอากาศร้อน

ในระยะต่อมา การวิจัยได้ประสพผลสำเร็จในการพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีความสามารถทำงานได้สูงในสภาวะเหลวและมีกำลังอัดสูงในสภาวะแข็งตัว ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ประสิทธิภาพของสารผสมเพิ่ม และสัดส่วนผสมที่เหมาะสม เป็นปัจจัยหลักของการผลิต จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ด้วยศักยภาพของมวลรวมและวัสดุผสมภายในประเทศมีพอเพียงที่จะใช้ผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ จากการศึกษาของ พิชัย[5] ได้ทดลองผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยใช้หินที่มีขนาดโตสุดระบุ 10 มม. สำหรับคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตไหล โดยทรายที่ใช้มีค่าโมดู

ลัสความละเอียดเท่ากับ 3.46 ด้วยสัดส่วนของทรายต่อมวลรวมที่ทำให้เกิดช่องว่างในการจัดเรียงตัวต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 42% ร่วมกับการใช้สารปอซโซลานและสารลดน้ำพิเศษ จะได้ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 760 – 1050 กก./ตร.ซม. และมีความไหลลื่นดี กล่าวคือมีค่ายุบตัวสูงกว่า 18 ซม. และการไหลแผ่อยู่ระหว่าง 50 – 60 ซม. ทั้งนี้จากการศึกษาพบว่าวัสดุปอซโซลานให้ผลในการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวได้ดี และคุณสมบัติด้านการไหลลื่นของส่วนผสมสามารถปรับปรุงได้ด้วยการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้การจำกัดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 300 – 335 กก./ ลบ.ม. ร่วมกับการใช้เถ้าลอยและสารลดน้ำพิเศษ จะทำให้สามารถผลิตคอนกรีตไหลความร้อนต่ำสำหรับใช้งานคอนกรีตหลาได้ ในงานวิจัยของ กิตติกร และ ณรงค์ศักดิ์[6,7] ได้เสนอแนวทางการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยมุ่งเน้นการปรับปรุงขนาดคละของมวลรวมเป็นประเด็นสำคัญ ในการศึกษาได้ทดสอบคุณสมบัติหลักของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ได้จากการออกแบบทั้งในสภาวะเหลวและแข็งตัว โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ตั้งแต่ 350 ถึง 550 กก./ลบ.ม. ด้วยสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ระหว่าง 0.22 ถึง 0.46 ร่วมกับการใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท ซัลโฟเนต แนพธาลีน ฟอร์มัลดีไฮด์ คอนเดนเซทพบว่าได้คอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด จึงเสนอขอบเขตขนาดคละมวลรวมที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงซึ่งได้จากการคำนวณค่ากลางของเส้นโค้งการกระจายขนาดคละของ ASTM C33 โดยกำหนดให้สัดส่วนมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 60 ต่อ 40 สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป และ จากข้อกำหนดของ ACI 304 และ DIN 1045 สำหรับคอนกรีตปั๊มพ์ และเพื่อให้สอดคล้องกับแง่ปฏิบัติ ขอบเขตการยอมรับจะกำหนดจากส่วนเบี่ยงเบนทางลถิติของอัตราผ่านตะแกรงของมวลรวมที่ช่องเปิดขนาดต่าง ๆ จากการรวบรวมข้อมูลในอุตสาหกรรมจริง

ในการศึกษาเกี่ยวกับการนำเอาเถ้าลอยและซิลิก้าฟูมมาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม หรือแทนที่ซีเมนต์ในคอนกรีตสมรรถนะสูงนั้น กรกฎ[8] ศึกษาการใช้เถ้าลอยเพื่อปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในอัตรา 15 30 45 และ 60% โดยน้ำหนัก พบว่าช่วยปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตตามสัดส่วนการแทนที่ ซึ่งจะทำให้สามารถลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงได้ 0.03 ต่อการเติมเถ้าลอยทุก ๆ 10% โดยน้ำหนัก ในขณะที่ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตยังคงเดิม ลดปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นได้ 0.1% โดยปริมาตรต่อปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น 15% โดยน้ำหนัก สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยพบว่าลดลงตามสัดส่วนแทนที่ในซีเมนต์ จากการศึกษาของ วิศว[9] พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงประมาณ 10 % ต่อการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทุก ๆ 10 % โดยน้ำหนัก และค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 10% ต่อการแทนที่ด้วยขี้เถ้าลอยทุก ๆ 10% โดยน้ำหนักเช่นกัน จากการศึกษาพบว่าสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเหมาะสมสำหรับปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตอยู่ที่ 35% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาของ สมภพ[10] พบว่าการใช้ซิลิก้าฟูมทดแทนซีเมนต์บางส่วนจะปรับปรุงกำลังอัดได้ โดยการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิก้าฟูม 15% ที่อายุ 1 3 และ 28 วันมีค่าเป็น 55 90 และ 140% ของกำลังอัดคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน และหากใช้ซิลิก้าฟูม 5% จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 3 และ 28 วันมีค่าเป็น 50 80 และ 110% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่ 28 วัน จากการศึกษาพบว่า การใช้ซิลิก้าฟูมในปริมาณสูงกว่า 5% จะลดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มปริมาณของสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการปรับแก้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

1.2.2 วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ปัจจุบันการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงในอุตสาหกรรม ยังคงยึดถือแนวทางการออกแบบส่วนผสมแบบดั้งเดิม โดยมุ่งเน้นการควบคุมคุณภาพของวัสดุผสม และการปรับแต่งคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยสารเคมีผสมเพิ่มและแร่ธาตุผสมเพิ่มเป็นสำคัญ ส่วนผสมที่เหมาะสมกับการใช้งานจะได้จากการทดลองผสมในห้องปฏิบัติการหรือในสนาม งานวิจัยได้รวบรวมวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบดั้งเดิมที่เป็นมาตรฐานเพื่อศึกษาถึงข้อดี ข้อด้อยและแนวทางในการประยุกต์ใช้กับการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบดั้งเดิมที่ทำการศึกษาได้แก่ วิธีการของ Road Note หมายเลข 4 วิธีของ DOE และวิธีของ ACI 211.1

1.2.2.1 วิธีการ Road Note No. 4[11]

ถูกนำเสนอขึ้นในปี 1950 โดย Road Research Laboratory เป็นวิธีทางเอมไพริกัล ได้รับความนิยมใช้งานในช่วงทศวรรษที่ 50 ถึง 60 นับเป็นรากฐานของการพัฒนาวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของอังกฤษในปัจจุบัน ขั้นตอนการออกแบบโดยวิธีของ Road Note No. 4 แสดงได้ดังรูปที่ 1.1 เริ่มจากกำหนดค่ายุบตัวและกำลังอัดเป้าหมายของคอนกรีตตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน กำหนดขนาดโตสุดของมวลรวมที่ใช้ กำหนดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ให้สอดคล้องกับกำลังอัดที่ออกแบบ ตามประเภทของซีเมนต์ที่ใช้จากกราฟในรูปที่ 1.1 ลำดับสุดท้ายจะพิจารณาสัดส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม ที่สัมพันธ์กับขนาดโตสุด รูปร่างของมวลรวมที่ใช้ ขนาดคละของมวลรวม และระดับความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด จากตารางที่ 1.1

จากการศึกษาพบว่า การออกแบบโดย Road Note No. 4 ได้มุ่งเน้นผลของขนาดคละและรูปร่างของมวลรวมที่มีต่อคุณสมบัติในสภาวะเหลวของคอนกรีตเป็นสำคัญ ซึ่งจะได้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติในสภาวะเหลวที่ดี กล่าวคือ ส่วนผสมจะมีความสามารถทำงานได้พอเพียง คอนกรีตจะมีเนื้อดีไม่หยาบหรือมีทรายมากจนเกินไป โดยมีเกณฑ์จำแนกขนาดคละของมวลรวมแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 อย่างไรก็ตามวิธีการออกแบบของ Road Note No. 4 ไม่ได้ให้ข้อมูลการออกแบบในกรณีที่มีการใช้สารผสมเพิ่มในคอนกรีต และพบว่าข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ผลในเชิงอนุรักษ์มาก ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบอยู่ในรูปของสัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ มิได้เป็นปริมาณของวัสดุผสมต่อหน่วยปริมาตรดังที่คุ้นเคยในวิธีการออกแบบในปัจจุบัน

1.2.2.2 วิธีการของ DOE[12]

เป็นวิธีที่ British Department of Environment เสนอขึ้นในปี 1975 มีรากฐานจากวิธี Road Note No. 4 และยังคงได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน ขั้นตอนการออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 1.4 เริ่มจากกำหนดค่ายุบตัวและกำลังอัดเป้าหมายของคอนกรีต กำหนดขนาดโตสุดของมวลรวม กำหนดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สอดคล้องกับกำลังอัดตามประเภทของซีเมนต์ที่ใช้ โดยที่อยู่ภายใต้ข้อกำหนดด้านความทนทาน จากข้อมูลในตารางที่ 1.2 1.3 และรูปที่ 1.5 ต่อมาจะประมาณปริมาณน้ำในส่วนผสมจากตารางที่ 1.4 ซึ่งสอดคล้องกับระดับความสามารถทำงานได้ ขนาดโตสุดและลักษณะรูปร่างของมวลรวมหยาบ และคำนวณปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม ต่อมาจะคำนวณปริมาณของมวลรวมทั้งหมดที่ใช้ในส่วนผสมโดยน้ำหนักหรือโดยปริมาตร ซึ่งการคำนวณโดยน้ำหนักต้องทราบค่าหน่วยน้ำหนักของ

พิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คอนกรีตสดที่สัมพันธ์กับปริมาณน้ำในส่วนผสมและค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมโดยพิจารณาได้จากรูปที่ 1.6 อัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมจะกำหนดโดยขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ดังรูปที่ 1.7

จากการศึกษาพบว่า วิธีของ DOE ได้พิจารณาถึงความสามารถทำงานได้ในสภาวะเหลว ผลของรูปร่างและขนาดของมวลรวมที่มีต่อความต้องการน้ำของส่วนผสม นอกจากนี้สัดส่วนผสมของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดยังสัมพันธ์กับการกระจายขนาดคละของมวลรวมละเอียดเท่านั้น มิใช่เป็นขนาดคละร่วมของมวลรวมหมือนในวิธีการของ Road Note No.4 เนื่องจากขนาดคละของมวลรวมหยาบจะมีผลต่อความต้องการน้ำของส่วนผสมน้อยกว่ามวลรวมละเอียดมาก โดยได้กำหนดบริเวณขนาดคละ (Grading zone) แทนเส้นโค้งการกระจายขนาดคละหมือนในวิธีการของ Road Note หมายเลข 4 จึงมีความเหมาะสมในทางปฏิบัติมากกว่า หลักการดังกล่าวนับเป็นจุดเด่นของวิธีการนี้ ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ภายใต้ข้อกำหนดด้านความทนทานตามมาตรฐานของ BS 8110 นอกจากนี้ยังได้คำนึงถึงผลของรูปร่างของมวลรวมที่มีต่อความแข็งแรงของบริเวณสัมผัสร่วมของมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตด้วย ต่อมาในปี 1988 DOE/BRE ได้ปรับปรุงวิธีการออกแบบโดยเพิ่มเติมการใช้เถ้าลอยเป็นสารสารผสมเพิ่มในคอนกรีต ซึ่งมีผลในการลดปริมาณน้ำในส่วนผสม และได้ปรับเปลี่ยนวิธีการกำหนดสัดส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมให้มีความสะดวกยิ่งขึ้นโดยพิจารณาจากร้อยละของส่วนที่ผ่านช่องเปิดขนาด 600 ไมครอน (BS Sieve No. 25) แทนการพิจารณาจากบริเวณขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามวิธีดั้งเดิม โดยสัดส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมที่เหมาะสมจะสัมพันธ์กับระดับความข้นเหลวจากการวัดโดยเวลาวีบีหรือค่ายุบตัว สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสม และขนาดโตสุดของมวลรวม ตัวอย่างสัดส่วนผสมของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมสำหรับมวลรวมขนาดโตสุด 20 มม. แสดงได้ดังรูปที่ 1.7 ซึ่งจะพบว่าส่วนละเอียดจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนผสมมีระดับความข้นเหลวสูงขึ้น หรือมีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงขึ้นเพื่อป้องกันการแยกตัวของส่วนผสม ในขณะที่ส่วนละเอียดจะลดลงเมื่อร้อยละของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 600 ไมครอนมีค่าสูงขึ้นเพื่อมิให้ส่วนผสมที่ได้มีการยึดเกาะตัวสูงเกินไป นอกจากนี้ส่วนละเอียดจะลดลงเมื่อขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบที่ใช้มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากส่วนผสมมีความต้องการน้ำน้อยกว่าในระดับความข้นเหลวที่เท่าเทียมกัน จะเห็นได้ว่าวิธีการออกแบบของ DOE ที่พัฒนาขึ้นนี้ได้คำนึงถึงผลของความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตเป็นสำคัญ โดยเฉพาะผลของมวลรวมที่มีต่อคุณสมบัติในสภาวะเหลวนั้นจะได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษ อย่างไรก็ตามการออกแบบโดยวิธี DOE ไม่ได้ให้ความสำคัญกับปริมาณของวัสดุผง ได้แก่ ซีเมนต์ หรือวัสดุผสมเพิ่มอื่น ๆ ที่มีต่อปริมาณความต้องการน้ำในส่วนผสม ซึ่งคาดว่าจะไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงซึ่งจะมีปริมาณซีเมนต์ในอัตราที่สูงกว่าคอนกรีตแบบดั้งเดิมมาก

1.2.2.3 วิธีการของ ACI Committee 211[13]

ACI Committee 211 เสนอวิธีการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตหน่วยน้ำหนักปกติ (ACI 211.1) ซึ่งได้ปรับปรุงข้อมูลสำหรับการออกแบบมาหลายครั้ง โดยล่าสุดในปี 1991 วิธีการของ ACI 211.1 ได้คำนึงถึงการใช้สารกักฟองอากาศ ตามมาตรฐานของ ASTM C233 เป็นสารเคมีผสมเพิ่ม โดยมีหลักการทั่วไปคล้ายคลึงกับวิธีของ DOE ขั้นตอนการออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 1.8 เริ่มจากกำหนดค่ายุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีต กำหนดขนาดโตสุดของมวลรวมให้เหมาะสมกับสภาพการทำงานซึ่ง ACI 211.1 ได้กำหนดให้ใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดโตสุดไม่เกิน 1 ใน 5 ของระยะด้านแคบที่สุดของแบบหล่อ และไม่เกิน 3 ใน 4 ของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม และไม่เกิน 1 ใน 3 ของความหนาแผ่นพื้น ต่อมากำหนดสัดส่วนโดยปริมาตรของมวลรวมหยาบที่เหมาะสมกับขนาดโตสุดที่ใช้

และค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายจากตารางที่ 1.5 ต่อมาจะประมาณปริมาณน้ำและปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากตารางที่ 1.6 ซึ่งปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมจะคำนวณได้จากสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีความสอดคล้องกับกำลังอัดจากตารางที่ 1.8 และข้อกำหนดเกี่ยวกับความทนทานซึ่งพิจารณาได้จากตารางที่ 1.7 ก และ ข และทำการคำนวณปริมาณของมวลรวมละเอียดที่ใช้โดยวิธีน้ำหนัก หรือคำนวณโดยปริมาตรสัมบูรณ์ ในทำนองเดียวกับวิธีการของ DOE การคำนวณโดยวิธีน้ำหนักต้องประมาณหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดซึ่งสัมพันธ์กับขนาดโตสุดของมวลรวมและการใช้สารกักฟองอากาศดังตารางที่ 1.9 ในลำดับสุดท้ายเป็นกระบวนการปรับแก้ส่วนผสมจากการทดลองผสมเพื่อให้ส่วนผสมคอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติตามความต้องการโดยพิจารณาจากคุณสมบัติในสภาวะเหลวและปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้น นอกจากนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าการออกแบบโดยวิธีการของ ACI 211.1 นั้นมวลรวมที่ได้จากการออกแบบจะอยู่ในสภาพแห้ง ซึ่งสามารถทำการเปลี่ยนให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งได้เมื่อทราบค่าการดูดซึมของมวลรวมนั้น ๆ โดยไม่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำที่ได้จากการประมาณในการออกแบบ

จากการศึกษาพบว่า วิธีการของ ACI 211.1 กำหนดให้น้ำในส่วนผสมสัมพันธ์กับระดับความข้นเหลว และขนาดโตสุดของมวลรวมที่ใช้ โดยมวลรวมขนาดใหญ่จะต้องการน้ำน้อยกว่า และส่วนผสมที่ใช้สารกักฟองอากาศก็จะต้องการน้ำน้อยกว่า ซึ่งจากแนวทางดังกล่าวจะพบว่า วิธีการ ACI 211.1 มิได้ให้ความสำคัญกับผลของรูปร่างและการกระจายขนาดคละของมวลรวมหยาบเท่าที่ควร อีกประการหนึ่งเนื่องจากวิธีการของ ACI 211.1 ได้ใช้ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดเป็นดัชนีเพื่อกำหนดสัดส่วนของมวลรวมหยาบในส่วนผสมแทนการใช้การกระจายขนาดคละดังเช่นในวิธีการของ DOE ทำให้วิธีของ ACI 211.1 ใช้งานได้กับวัสดุมวลรวมที่อยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดเท่านั้นและการไม่พิจารณาถึงการกระจายขนาดคละและปริมาณช่องว่างที่เกิดขึ้น มีผลให้ปริมาณมวลรวมหยาบที่ใช้ในส่วนผสมอาจมีค่าต่ำเกินไป นอกจากนี้ส่วนผสมมีแนวโน้มแยกตัวได้ง่ายเมื่อออกแบบในช่วงความข้นเหลวสูง เนื่องจากขาดส่วนละเอียด นอกจากนี้พบว่าวิธีการ ACI 211.1 ไม่เหมาะกับการใช้ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงซึ่งมีปริมาณซีเมนต์ สูงกว่าคอนกรีตแบบดั้งเดิม เนื่องจาก ACI 211.1 ไม่ได้พิจารณาผลของวัสดุผงที่มีต่อปริมาณความต้องการน้ำในส่วนผสม ซึ่งจะทำให้การประมาณปริมาณน้ำในส่วนผสมจะมีความผิดพลาดในเกณฑ์สูง

จากการพิจารณาถึงข้อดีและข้อด้อยของวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบดั้งเดิม พบว่าข้อมูลที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลจากการทดลอง ด้วยคุณสมบัติของวัสดุผสมที่แตกต่างจากสภาพวัตถุดิบภายในประเทศ ซึ่งการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง คุณสมบัติของคอนกรีตจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุผสม และสัดส่วนการผสมสูง อย่างไรก็ตามแนวทางการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบดั้งเดิมยังคงนำมาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ แต่ต้องพิจารณาเกี่ยวกับ การกำหนดสัดส่วนของมวลคละ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วงคอนกรีตกำลังสูง การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในระยะต้นที่ 24 ชั่วโมง รวมทั้งผลของการใช้สารเคมีผสมเพิ่มและสารผสมเพิ่มประเภทปอซโซลาน ซึ่งได้จากการตั้งสมมติฐานร่วมกับการวิเคราะห์ผลทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูงจากงานวิจัยที่ผ่านมา

1.2.3 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

เนื่องจากวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมีความยุ่งยาก การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบจึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง Azaz-un-Nabi[15] ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CONMIX สำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ด้วยภาษาเบสิก (MS-Quick Basic Version 4.5) ทำงานบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ สามารถใช้ออก

แบบส่วนผสมคอนกรีตดั้งเดิมด้วยวิธี ACI 211.1-91 และ วิธีของ DOE (1975) โดยมีการปรับแก้ส่วนผสมตามคำแนะนำของ ACI 211.1 Sikka พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Firstmix สามารถใช้ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตตามวิธี DOE (1988) นอกจากความสามารถในการทำงานพื้นฐานที่โปรแกรมออกแบบส่วนผสมคอนกรีตควรจะมีแล้วยังได้เพิ่มอรรถประโยชน์ในการใช้งานอีกหลายประการ อาทิเช่น ให้ผู้ออกแบบทำการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางด้านกำลังอัดของซีเมนต์ที่ใช้ให้มีค่าแตกต่างจากที่กำหนดไว้จากค่าที่กำหนดโดยในวิธีการของ DOE เดิม เลือกกำหนดค่ากำลังอัดเป้าหมายของคอนกรีตซึ่งอ้างอิงจากตัวอย่างทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 หรือตัวอย่างลูกบาศก์ตามมาตรฐาน BS 1881: Part 108 สามารถกำหนดส่วนคละของมวลหยาบที่ใช้ และยังสามารถแสดงผลการคำนวณในรูปแบบของรายงานและใช้งานได้ง่าย

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง ที่ครอบคลุมถึงขบวนการย่อยของการออกแบบทั้งหมด นับตั้งแต่การตรวจสอบ กำหนดมวลคละให้มีความเหมาะสมตามข้อกำหนดของการผลิต กำหนดปริมาณของวัสดุผสม ได้แก่ มวลรวม ซีเมนต์ น้ำ และวัสดุปอซโซลาน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดตามต้องการ หรือสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ แล้วทำการปรับแต่งคุณสมบัติในสภาวะเหลวด้วยน้ำยาเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษ เพื่อจะประกันส่วนผสมที่ได้ให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงในสามประเภท คือ คอนกรีตไหล คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตหลา

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 วัสดุผสมและวิธีการผสม

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิจัย มีขอบเขตใช้งานกับวัสดุผสมสำหรับงานคอนกรีตดั้งเดิม ซึ่งประกอบด้วย มวลรวมตามมาตรฐานของ มอก.566-2528 หรือ ASTM C33 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน มอก.15-2532 หรือ ASTM C150 วัสดุปอซโซลานที่ใช้ ได้แก่ เถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.850-2532 หรือ ASTM C618 และซิลิก้าฟูมตามมาตรฐาน ASTM C1240 น้ำยาเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างมากสำหรับการผลิตคอนกรีตไหลชนิดที่มีสารพื้นฐานเป็นแนพธาลีน ตามมาตรฐาน มอก.985-2533 หรือ ASTM C494 ชนิด F และ G โดยใช้งานกับวิธีผสมของอุตสาหกรรมคอนกรีตในปัจจุบัน

1.4.2 ขีดจำกัดคุณสมบัติคอนกรีตสมรรถนะสูง

1.4.2.1 การไหล

คอนกรีตสมรรถนะสูงใช้มวลรวมหยาบขนาดโตสุด ¾ นิ้ว (20 มม.) จึงมีค่ายุบตัวสูงสุดในกรณีที่เพลสต์มีกำลังเฉือนต่ำที่สุดไม่เกิน 27.5 เซนติเมตร และมีค่าการไหลตัวสูงสุดได้ถึง 70 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขีดจำกัดสูงสุดของการวัดโดยโต๊ะการไหลตามมาตรฐาน DIN 1048

1.4.2.2 กำลัง

คอนกรีตสมรรถนะสูงที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ ด้วยการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดาร่วมกับการปรับแต่งด้วยน้ำยาเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษ ที่สภาวะการบ่มตามมาตรฐาน ASTM C192 มีกำลังอัดสูงสุดที่ 28 วันไม่เกิน 850 กก./ตร.ซม.

1.4.2.3 อุณหภูมิเพิ่ม

อุณหภูมิเพิ่มของส่วนผสมสัมพันธ์กับสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย เพื่อมิให้กระทบต่อการพัฒนากำลังอัดในระยะต้นของคอนกรีต ในงานวิจัยได้จำกัดสัดส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชนิด C สูงสุดที่ร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอยชนิด F ที่ร้อยละ 25 ตามคำแนะนำของ ACI Committee 211.4 และด้วยปริมาณซีเมนต์ต่ำสุดไม่น้อยกว่า 300 กก./ลบ.ม. จะสามารถควบคุมอุณหภูมิเพิ่มต่ำสุดได้ 35 องศาเซลเซียส สำหรับการใช้เถ้าลอยชนิด C และ 30 องศาเซลเซียส สำหรับเถ้าลอยชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM ตามลำดับ ทั้งนี้ขีดจำกัดของอุณหภูมิเพิ่มต่ำสุดยังสัมพันธ์กับค่ายุบตัวเริ่มต้น กำลังอัดตามอายุ และความสามารถไหลตัวของคอนกรีต

1.4.3 ขีดจำกัดการทำงานของโปรแกรม

1.4.3.1 การคำนวณสัดส่วนผสมของมวลรวมหยาบและละเอียด

โปรแกรมสามารถระบุได้ว่ามวลรวมที่นำมาใช้มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงหรือไม่ อย่างไรก็ตาม โปรแกรมไม่สามารถบ่งชี้ถึงแนวทางการปรับปรุงขนาดคละของมวลรวมจากขนาดคละร่วมของมวลรวมที่มีอยู่ได้ ซึ่งผู้ออกแบบต้องทดลองหากลุ่มของมวลรวมพิเศษเพื่อใช้ปรับปรุงขนาดคละร่วมของมวลรวมเอง แต่ถึงกระนั้นการคำนวณก็สามารถรองรับต่อการใช้งานมวลรวมสูงสุดถึง 4 กลุ่มซึ่งคาดว่ามีความเพียงพอต่อการปรับปรุงขนาดคละในกรณีทั่ว ๆ ไปได้ อย่างไรก็ตามมวลรวมที่นำมาใช้ผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงควรมีคุณสมบัติตาม มอก.566-2528 หรือ ASTM C33 เป็นอย่างน้อย มวลรวมที่มีขนาดคละไม่ปกติบางประเภท เช่น ขนาดคละขาดตอน (Gapped grade) ไม่ลมควรนำมาใช้เพราะนอกจากจะปรับแต่งขนาดคละได้ยากแล้วยังจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงได้

1.4.3.2 ปริมาณฟองอากาศในส่วนผสม

โปรแกรมไม่สามารถประมาณปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมได้เนื่องจากยังขาดการศึกษาในแบบจำลองที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าผลของปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมมีผลไม่มากนักต่อคุณสมบัติในสภาวะแข็งตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ได้เนื่องจากมีอยู่ในปริมาณที่ต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 2 โดยปริมาตร) ในโปรแกรมให้เป็นค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบที่ผู้ออกแบบต้องกำหนดเอง

1.4.3.3 ปริมาณช่องว่างของมวลรวม

ปริมาณช่องว่างในการจัดเรียงตัวของมวลรวมในสภาพอัดแน่นเป็นพารามิเตอร์หนึ่งในการออกแบบซึ่งโปรแกรมไม่สามารถทำการคำนวณได้จากคุณสมบัติของมวลรวม ดังนั้นจึงกำหนดให้เป็นค่าที่ผู้ออกแบบต้องกำหนดซึ่งจะได้จากการทดสอบตามวิธีมาตรฐานของ ASTM C29

1.4.3.4 ประเภทของซีเมนต์ที่ใช้

โปรแกรมรองรับต่อการออกแบบส่วนผสมโดยใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 (OPC) เท่านั้น การใช้ซีเมนต์ประเภทอื่น ๆ ต้องการผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงจากซีเมนต์ชนิดนั้น ๆ เพิ่มเติม อย่างไรก็ตามโปรแกรมได้รองรับถึงผลดังกล่าว โดยให้ผู้ออกแบบสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อสมการกำลังอัดและสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ทั้งนี้ไม่นับรวมถึงการใช้สารปอซโซลานร่วมกับซีเมนต์ประเภทดังกล่าว นอกจากนี้ยังรองรับถึงผลของปริมาณน้ำที่ต้องใช้เนื่องจากความละเอียดที่แตกต่างกันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทั้ง 3 ประเภท

1.4.3.5 การกำหนดปริมาณน้ำในส่วนผสมที่เพียงพอต่อการยุบตัวเริ่มต้น

เพื่อความสม่ำเสมอของคุณสมบัติคอนกรีตที่ได้ความผิดพลาดในการทำนายค่ายุบตัวเริ่มต้นโดยโปรแกรมอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วยคอนกรีตผสมเสร็จ (มอก.213-2520) ดังตารางที่ 1.10 อย่างไรก็ตามการใช้มวลรวมที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 566-2528 จะมีผลทำให้ผลการทำนายค่ายุบตัวเริ่มต้นผิดพลาดมากขึ้นหากมิได้ทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอย่างถูกต้อง ได้แก่ ผลของรูปร่าง ขนาดคละ ลักษณะพื้นผิว และช่องว่างในสภาวะอัดแน่นของมวลรวม นอกจากนี้สภาพความชื้นของมวลรวมก็มีผลอย่างยิ่งต่อผลความคลาดเคลื่อนดังกล่าว

1.4.3.6 การปรับแต่งการไหลด้วยน้ำยาเคมีผสมเพิ่ม

การคำนวณปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมทำได้ภายใต้ขอบเขตการใช้งานปกติคืออยู่ระหว่างร้อยละ 0.5 ถึง 3.0 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ การใช้งานในขอบเขตนอกเหนือจากนี้สามารถทำได้หากได้ทำการทดสอบแล้วว่าไม่ส่งผลกระทบในเชิงลบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้ นอกจากนี้การใช้ซิลิก้าฟูมแทนที่ซีเมนต์บางส่วนจะมีผลในการลดความสามารถทางการไหลของคอนกรีตสมรรถนะสูงทำให้ต้องเพิ่มปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษซึ่งปัจจุบันโปรแกรมยังไม่สามารถคำนวณผลในส่วนนี้ได้ เพียงแต่จะจำกัดสัดส่วนการแทนที่ให้มีค่าต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 15) เพื่อลดผลกระทบในส่วนนี้ให้มากที่สุด

1.5 การดำเนินการวิจัย

การวิจัยเริ่มจากการศึกษาเพื่อกำหนดวิธีการที่ใช้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงจากวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบดั้งเดิม และวิธีการออกแบบคอนกรีตกำลังสูง หรือคอนกรีตสมรรถนะสูง ร่วมกับแนวทางในการกำหนดมวลคละที่เหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง จากงานวิจัยที่ผ่านมา ลำดับต่อมาจะวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติหลักของคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยวิธีการทางสถิติร่วมกับทฤษฎีที่เหมาะสม เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ควบคุมคุณสมบัติหลักของส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงจากการออกแบบในสามประเด็นหลัก ได้แก่ การไหล กำลังอัด และอุณหภูมิควบคุมในคอนกรีตหลา

ด้านการไหล ได้ศึกษาถึงผลของวัสดุผสมที่มีต่อค่ายุบตัวและการไหลตัวของคอนกรีต โดยใช้หลักการของน้ำอิสระที่พิจารณาถึงผลของขนาดคละ รูปร่าง และช่องว่างในสภาพอัดแน่นของมวลรวม ผลของปริมาณและประเภทของ วัสดุผง จนกระทั่งการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีดด้วยน้ำยาเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำ

พิเศษตามมาตรฐาน มอก.985-2533 หรือ ASTM C494 ชนิด G และ F ประเภทสารประกอบพื้นฐานเป็นแนพธาลีน ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม

ด้านกำลัง ได้ศึกษาถึงผลของสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และวัสดุผสมเพิ่มหรือทดแทนซีเมนต์อื่น ๆ ได้แก่ เถ้าลอย และซิลิก้าฟูม รวมทั้งผลของการพัฒนากำลังอัดตามอายุโดยหลักการเจริญเติบโต (Maturity concept)

ด้านอุณหภูมิซึ่งมีความจำเป็นต้องควบคุมในคอนกรีตหลา ได้ศึกษาถึงผลของปริมาณซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ทดแทนซีเมนต์บางส่วนที่มีต่ออุณหภูมิเพิ่มสูงสุดและอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในสภาพกักกันความร้อน พร้อมกันนั้นได้ทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติเพื่อเปรียบเทียบผลของการกระจายอุณหภูมิกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโครงสร้างคอนกรีตหลาในสนาม เพื่อศึกษาถึงค่าปรับแก้ที่เหมาะสมสำหรับใช้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตหลาในทางปฏิบัติ

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยคำนวณออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งสามประเภท มุ่งเน้นให้เกิดความสะดวกต่อการใช้งานในอุตสาหกรรม และรองรับต่อการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในอนาคต นอกจากนี้ได้ทำการทดลอบการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งสามประเภท และทดสอบคุณสมบัติหลักต่าง ๆ เพื่อยืนยันความถูกต้อง ถึงวิธีการออกแบบที่ใช้

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งสามประเภท คือ คอนกรีตไหล คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตหลา สามารถสนองตอบความต้องการของอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จในปัจจุบันได้ นอกจากนี้วิธีการออกแบบส่วนผสมในงานวิจัยสามารถเป็นแนวทางเพื่อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วยคอนกรีตสมรรถนะสูงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.1 สัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์กำหนดใน Road Note No.4 [11]

(c) Angular Aggregate (¾ in. down)

Degree of workability		Very Low				Low				Medium				High			
Grading of aggregate (Curve No. on Fig. 2)		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Water/cement ratio by weight	0·35	3·2	3·0	2·9	2·7	2·7	2·7	2·5	2·4	2·4	2·4	2·3	2·2	2·2	2·3	2·1	2·1
	0·40	4·5	4·2	3·7	3·5	3·5	3·5	3·2	3·0	3·1	3·1	2·9	2·7	2·9	2·9	2·8	2·6
	0·45	5·5	5·0	4·6	4·3	4·3	4·2	3·9	3·7	3·7	3·7	3·4	3·3	3·5	3·5	3·2	3·1
	0·50	6·5	5·8	5·4	5·0	5·0	4·9	4·5	4·3	4·2	4·2	3·9	3·8	×	3·9	3·8	3·5
	0·55	7·2	6·6	6·0	5·6	5·7	5·4	5·0	4·8	4·7	4·7	4·5	4·3	×	×	4·3	4·0
	0·60	7·8	7·2	6·6	6·3	6·3	6·0	5·6	5·3	×	5·2	4·9	4·8	×	×	4·7	4·4
	0·65	8·3	7·8	7·2	6·9	6·9	6·5	6·1	5·8	×	5·7	5·4	5·2	×	×	5·1	4·9
	0·70	8·7	8·3	7·7	7·5	7·4	7·0	6·5	6·3	×	6·2	5·8	5·7	×	×	5·5	5·3
	0·75	—	—	8·2	8·0	7·9	7·5	7·0	6·8	×	×	6·2	6·1	×	×	5·8	5·7
	0·80	—	—	—	—	—	—	7·4	7·2	×	×	6·6	6·5	×	×	6·1	6·0
	0·85					—	—	7·8	7·6	×	×	7·1	6·9	×	×	6·4	6·3
	0·90					—	—	—	—	×	×	7·5	7·3	×	×	×	6·7
	0·95									×	×	8·0	7·6	×	×	×	7·0
	1·00									×	×	—	—	×	×	×	7·3

These proportions are based on specific gravities of approximately 2·7 for both coarse and fine aggregate

ตารางที่ 1.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 สำหรับปูนปอร์ตแลนด์และปูนปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว[12]

Type of cement	*Type of coarse aggregate*	*Compressive strengths (N/mm²)*			
		Age (days)			
		3	7	28	91
Ordinary Portland	Uncrushed	18	27	40	48
	Crushed	23	33	47	55
Rapid-hardening Portland	Uncrushed	25	34	46	53
	Crushed	30	40	53	60

ตารางที่ 1.3 ข้อกำหนดส่วนผสมคอนกรีตและระยะหุ้มเหล็กเพื่อความทนทานตามมาตรฐาน BS 8110[12]

Exposure condition	*Nominal cover (mm)*			
Mild	25	20	20	20
Moderate	—	35	30	20
Severe	—	—	40	25
Very severe	—	—	50	30
Maximum free w/c ratio	0.65	0.60	0.55	0.45
Minimum cement content (kg/m³)	275	300	325	400
Concrete f_{cu} (N/mm²)	30	35	40	50

ตารางที่ 1.4 ปริมาณน้ำของส่วนผสมโดยวิธีการออกแบบของ DOE [12]

Slump (mm):		0–10	10–30	30–60	60–180
VB time (seconds):		> 12	12–6	6–3	3–0
Maximum size of aggregate (mm)	*Type of aggregate*				
10	Uncrushed	150	180	205	225
	Crushed	180	205	230	250
20	Uncrushed	135	160	180	195
	Crushed	170	190	210	225
40	Uncrushed	115	140	160	175
	Crushed	155	175	190	205

ตารางที่ 1.5 ปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีตตาม ACI 211.1-91[13]

Nominal maximum size of aggregate, mm	Volume of dry-rodded coarse aggregate* per unit volume of concrete for different fineness modulii of fine aggregate			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

ตารางที่ 1.6 ปริมาณน้ำของส่วนผสมโดยวิธีการออกแบบของ ACI 211.1-91 [13]

	Water, Kg/m³ of concrete for indicated nominal maximum sizes of aggregate							
Slump, mm	9.5*	12.5*	19*	25*	37.5*	50†*	75†‡	150†‡
Non-air-entrained concrete								
25 to 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 to 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 to 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Approximate amount of entrapped air in non-air-entrained concrete, percent	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Air-entrained concrete								
25 to 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 to 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 to 175	216	205	197	184	174	166	154	—
Recommended average§ total air content, percent for level of exposure:								
Mild exposure	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5**††	1.0**††
Moderate exposure	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5**††	3.0**††
Extreme exposure‡‡	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5**††	4.0**††

ตารางที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธี ACI 211.1 [13]

Compressive strength at 28 days, MPa*	Water-cement ratio, by mass	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
40	0.42	---
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

ตารางที่ 1.8 ก) ข้อกำหนดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ตามวิธีออกแบบของ ACI 211.1-91 [13]

Type of structure	Structure wet continuously or frequently and exposed to freezing and thawing†	Structure exposed to sea water or sulfates
Thin sections (railings, curbs, sills, ledges, ornamental work) and sections with less than 3 cm cover over steel	0.45	0.40‡
All other structures	0.50	0.45‡

*Based on the report of ACI Committee 201, "Durability of Concrete in Service," previously cited.

†Concrete should also be air-entrained.

‡If sulfate resisting cement (Type II or Type V of ASTM C 150) is used, permissible water-cement ratio may be increased by 0.05.

ตารางที่ 1.8 ข) ข้อกำหนดการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตต้านทานซัลเฟตตาม ACI 201.2R [14]

Exposure	Water soluble sulfate* (SO_4) in soil, percent	Sulfate* (SO_4) in water, ppm	Cement	Water-cement ratio, maximum'
Mild	0.00-0.10	0-150	—	—
Moderate'	0.10-0.20	150-1500	Type II, IP(MS), IS(MS)[‡]	0.50
Severe	0.20-2.00	1500-10,000	Type V[‡]	0.45
Very severe	Over 2.00	Over 10,000	Type V + pozzolan or slag**	0.45

*Sulfate expressed as SO_4 is related to sulfate expressed as SO_3 as in reports of chemical analysis of cement as $SO_3 \times 1.2 = SO_4$.

'When chlorides or other depassivating agents are present in addition to sulfate, a lower water-cement ratio may be necessary to reduce corrosion potential of embedded items. Refer to Chapter 4.

[‡]Or a blend of Type I cement and a ground granulated blast furnace slag or a pozzolan that has been determined by tests to give equivalent sulfate resistance.

[‡]Or a blend of Type II cement and a ground granulated blast furnace slag or a pozzolan that has been determined by tests to give equivalent sulfate resistance.

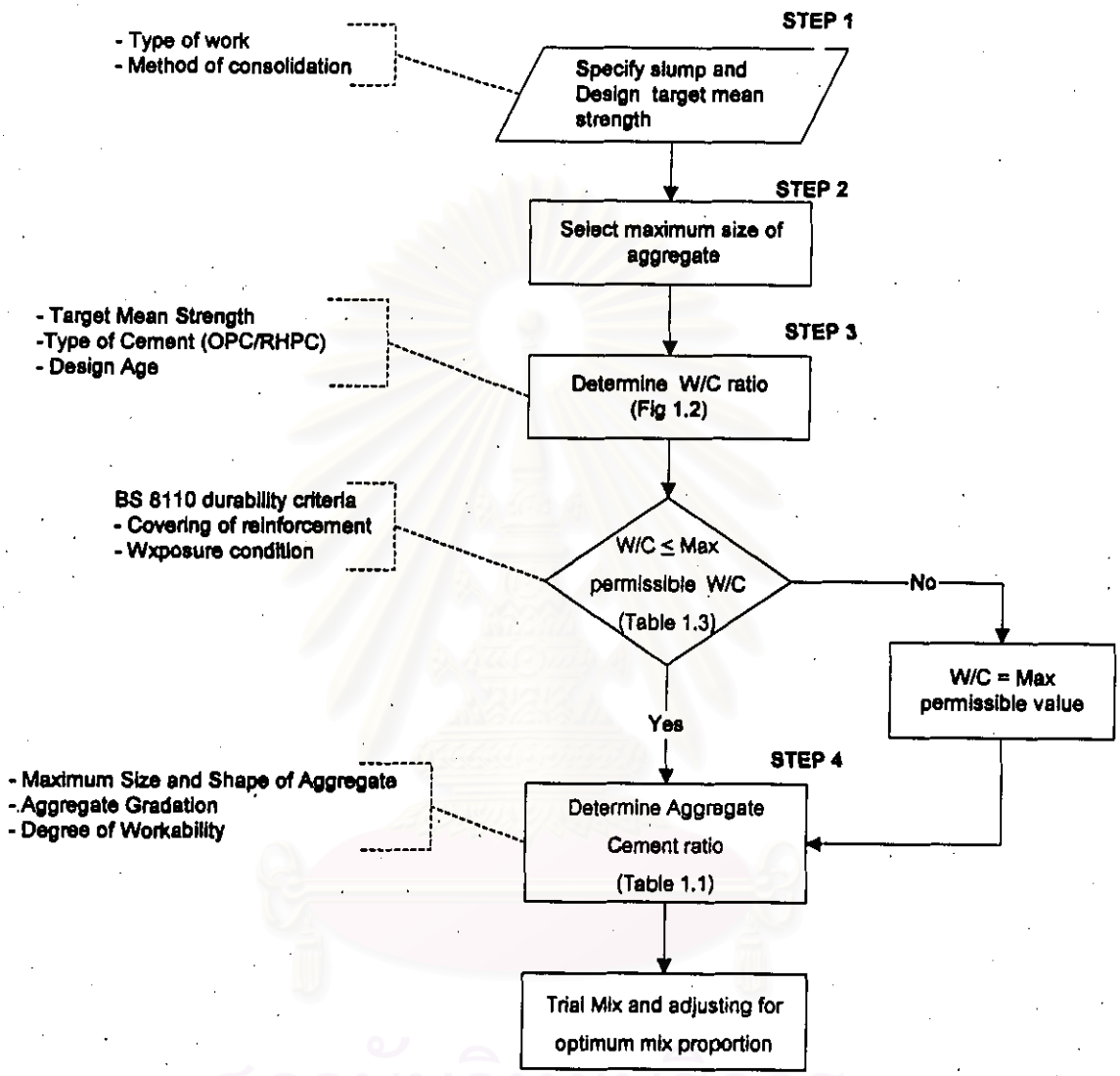
**Use a pozzolan or slag that has been determined by tests to improve sulfate resistance when used in concrete containing Type V cement.

ตารางที่ 1.9 ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณโดยวิธีของ ACI 211.1 [13]

Nominal maximum size of aggregate, mm	First estimate of concrete unit mass, kg/m³	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
9.5	2280	2200
12.5	2310	2230
19	2345	2275
25	2380	2290
37.5	2410	2350
50	2445	2345
75	2490	2405
150	2530	2435

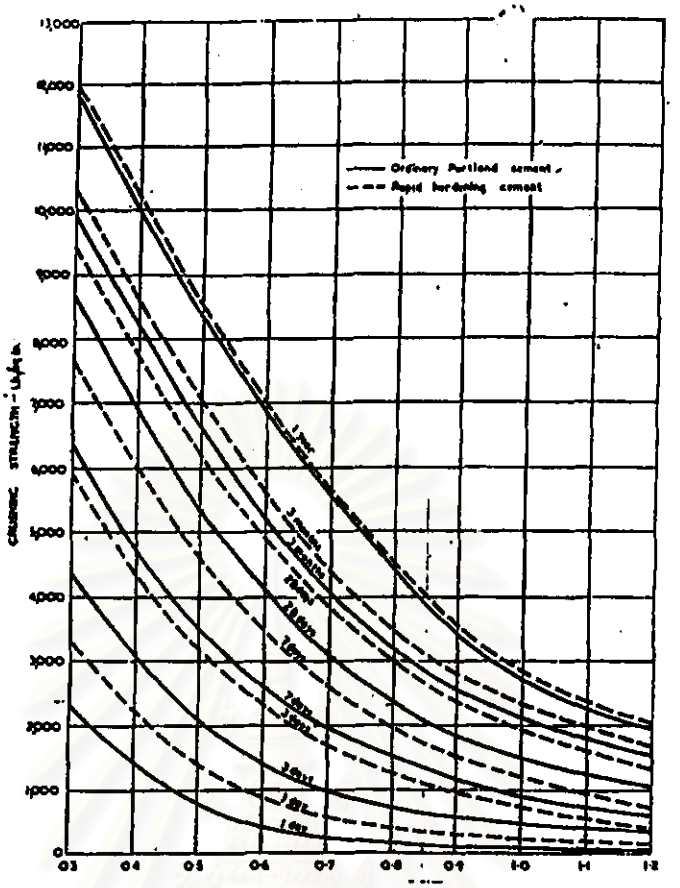
ตารางที่ 1.10 ข้อกำหนดคุณสมบัติความสม่ำเสมอของคอนกรีตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วยคอนกรีตผสมเสร็จ (มอก. 213-2520)

การทดสอบ	2 ตัวอย่างมีค่าต่างกันไม่เกิน
ความยุบตัว ไม่เกิน 75 มิลลิเมตร เกิน 75 มิลลิเมตร	25 มิลลิเมตร 40 มิลลิเมตร
ปริมาณอากาศในคอนกรีต (air content) ร้อยละของปริมาตร	1.0
ปริมาณมวลผสมหยาบในคอนกรีต (coarse aggregate content) ร้อยละของน้ำหนัก	6.0
หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ปราศจากอากาศ (unit weight of air-free mortar) ร้อยละ	1.6

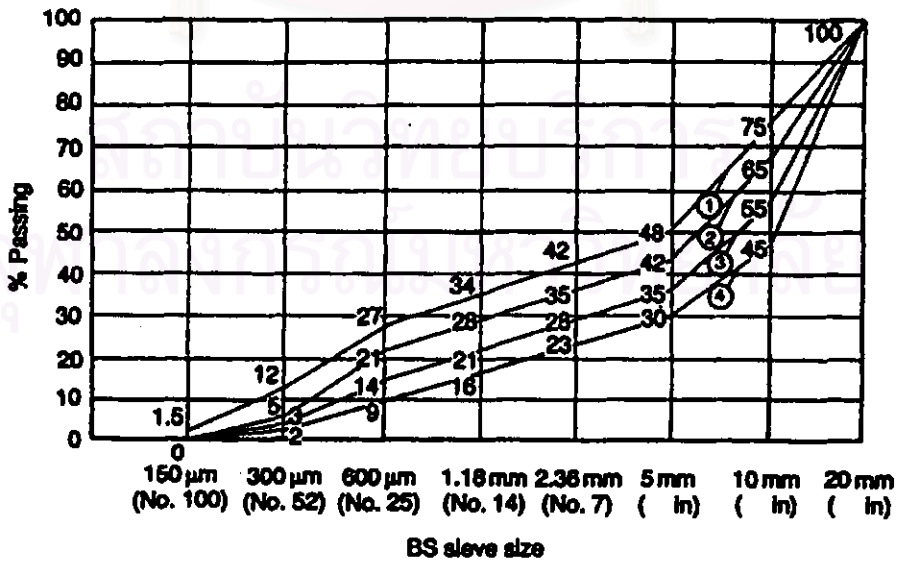


รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธีของ Road Note No. 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

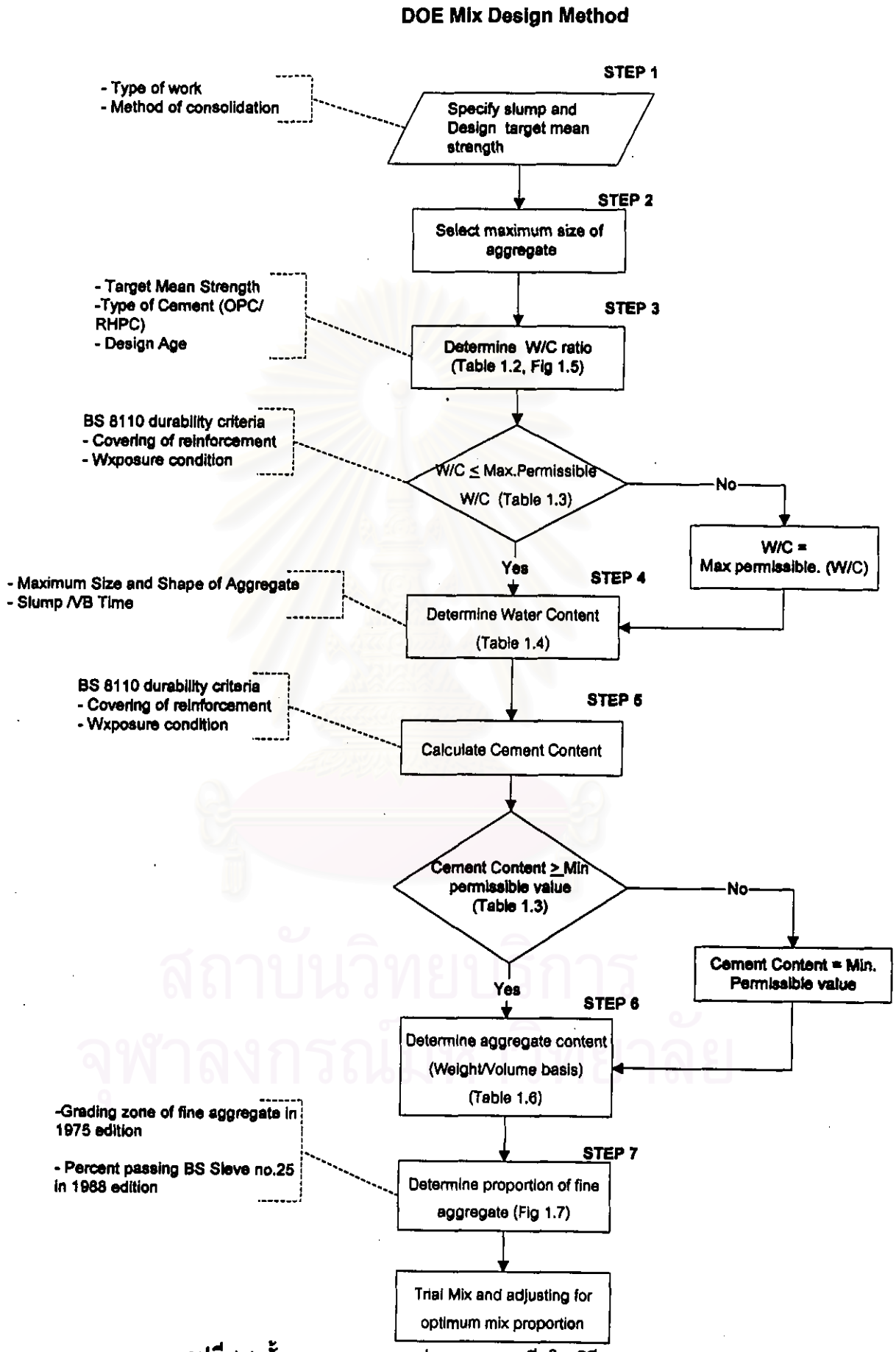


รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีของ Road Note No.4[11]

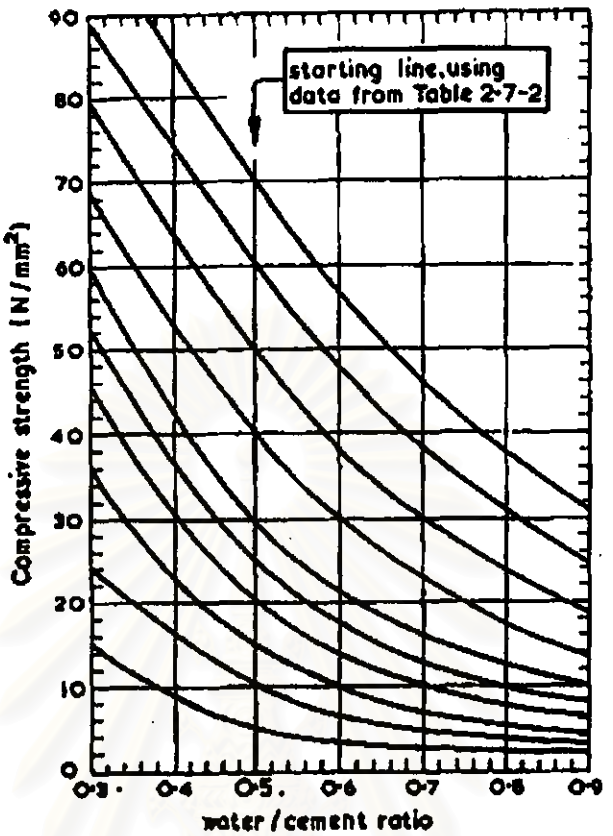


รูปที่ 1.3 ขอบเขตขนาดคละของมวลรวมที่กำหนดโดย Road Note No. 4[11]

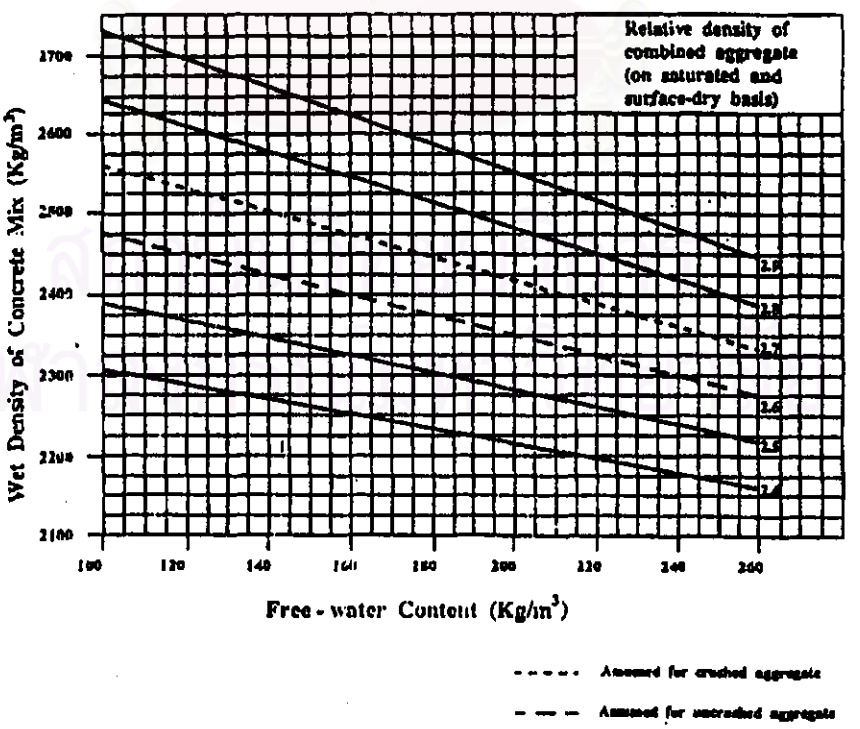
(ขนาดโตสุด 20 มม.)



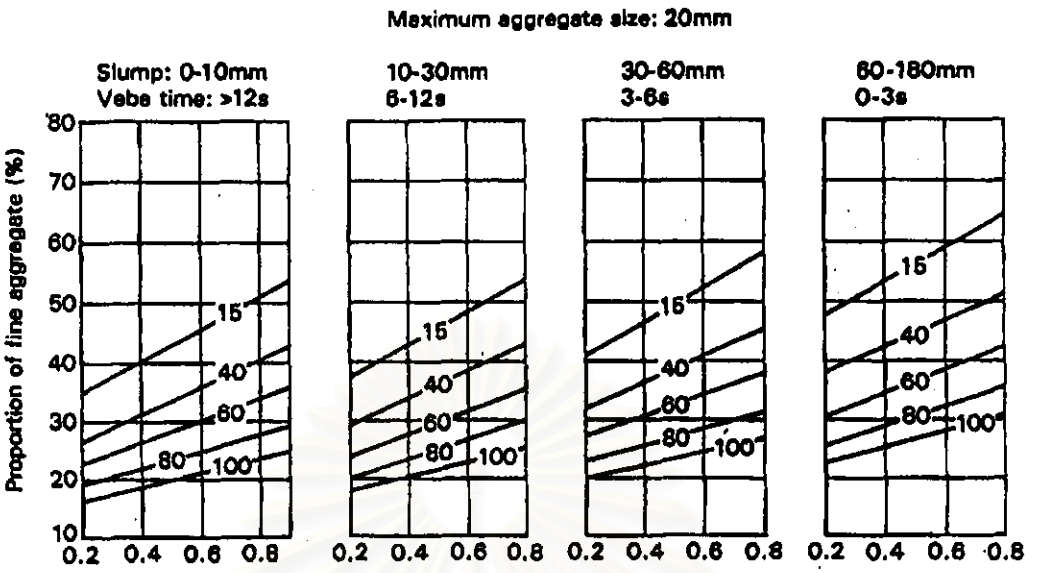
รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธีของ DOE



รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (ลูกบาศก์) และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยวิธีของ DoE [12]

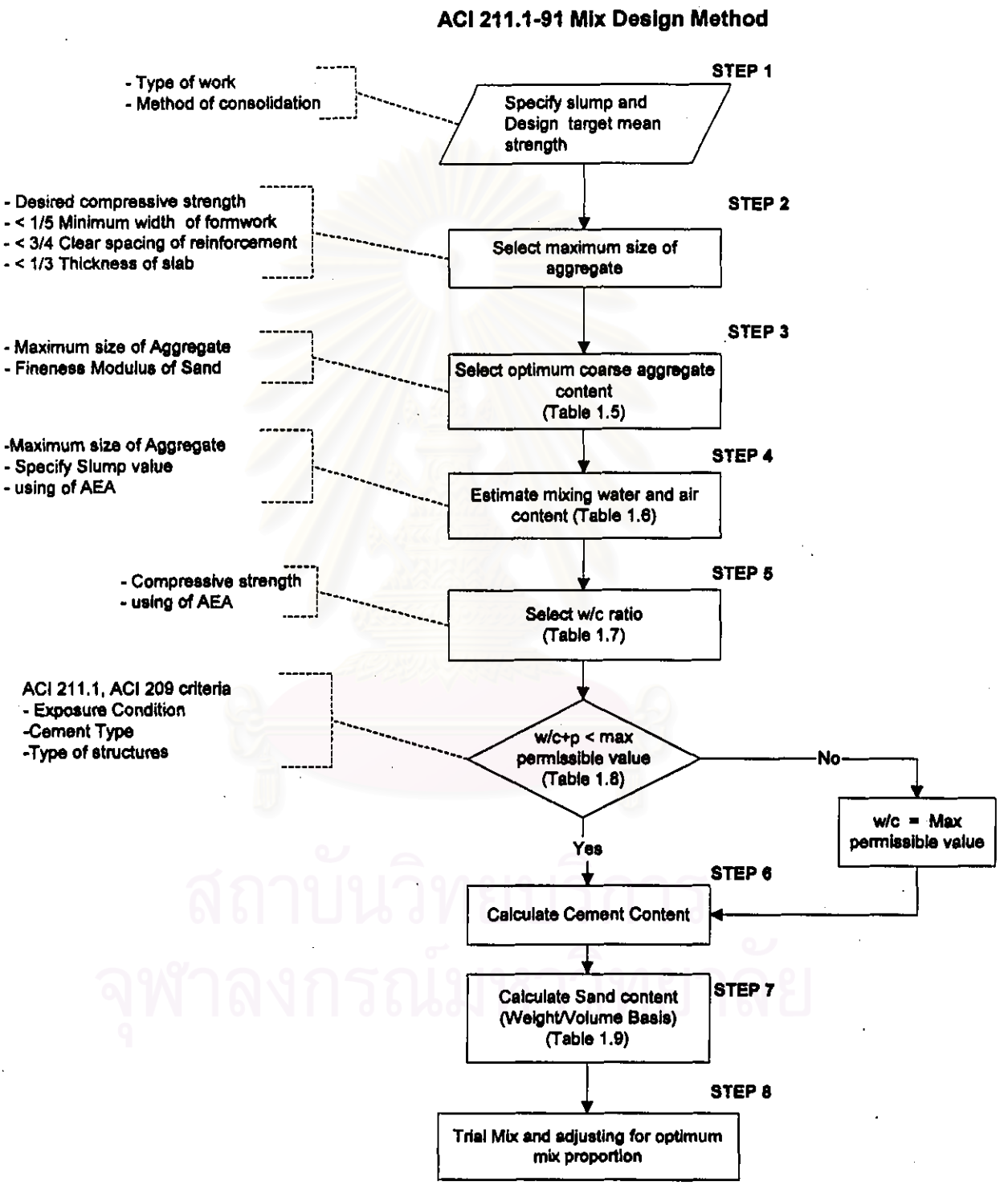


รูปที่ 1.6 ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณในวิธีการออกแบบของ DoE [15]



รูปที่ 1.7 สัดส่วนของมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมโดยวิธีของ BRE/DOE สำหรับมวลรวมขนาดโตสุด 20 มม. [12]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.8 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธีของ ACI 211.1-91