# การกำหนดส่วนผสมคอนกรีตแบบอัตราส่วนคงที่

# Concrete Mix Proportioning by Nominal Mix Method

สุรพงษ์ ดาราม

ภาควิชาการออกแบบและบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี
Email: surapong.d@fitm.kmutnb.ac.th

**บทคัดย่อ**

วิธีกำหนดส่วนผสมคอนกรีตแบบอัตราส่วนคงที่เป็นที่ใช้งานมายาวนาน ในปัจจุบันวิธีการนี้ยังนิยมใช้ในงานผสมคอนกรีตในโครงการเองหรืองานขนาดเล็ก ส่วนผสมคอนกรีตจะถูกกำหนดในรูปแบบอัตราส่วนอย่างง่ายเพื่อให้เกิดความสะดวกในการทำงานและตวงวัดโดยใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในโครงการ ในบทความได้แสดงขั้นตอนในการกำหนดส่วนผสมด้วยวิธีนี้ประกอบด้วย การกำหนดอัตราส่วนผสมจากลักษณะการใช้ประโยชน์ การกำหนดช่วงค่าการยุบตัวโดยใช้อัตราส่วนมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์และกำหนดปริมาณน้ำจากช่วงค่าการยุบตัว ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมีผลต่อความสามารถในการทำงาน แต่อาจจะไม่ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัด คอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปานกลางมีค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุด อัตราส่วนผสม 1:2:3 เหมาะสมสำหรับงานทั่วไปและอัตราส่วนผสม 1:1.5:3 เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนคอนกรีตหยาบควรใช้อัตราส่วนผสม 1:3:5 การปรับลดสัดส่วนปริมาณหินทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานและค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ:** คอนกรีต การกำหนดส่วนผสม วิธีอัตราส่วนคงที่

**Abstract**

The nominal mix method or fixed ratio concrete method is a long-used method. Nowadays, this method is still using for on-site mixed concrete or small project. Concrete mixtures are defined in a simple ratio format for ease of operation and measuring by using the equipment available in the project. In the article, the proportioning procedures by this method are described: determine the ratio from the utilized characteristics, select the range of slump using ratio of total aggregate per cement and determine water content from the range of slump. The cement content affects concrete workability but may not improving the compressive strength. Concrete group having medium cement has the highest efficiency. Mixing ratio of 1: 2: 3 is suitable for general applications and mixing ratio of 1: 1. 5: 3 is suitable for applications that required more strength. For Lean concrete, the mixing ratio of 1: 3: 5 should be used. The reduction of the course aggregate ratio results in increment of concrete workability and higher compressive strength.

**Keywords:** Concrete, Mix proportion, Nominal mix

*Corresponding author, e-mail: surapong.d@fitm.kmutnb.ac.th

## 1. ที่มาและความสำคัญ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากเป็นวัสดุที่ช่างทั่วไปคุ้นเคย มีความทนทาน ช่วงการใช้งานที่ยาวนานและการบำรุงรักษาค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่นเช่นไม้และเหล็ก คอนกรีตที่มีคุณภาพดีเกิดจากจากส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมหลักประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียดและน้ำ ส่วนผสมหลักแต่ละอย่างมีหน้าที่เฉพาะเช่น ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบหลักที่ทำให้เกิดความแข็งแรงจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ) ซีเมนต์เพสต์ทำหน้าที่ยึดเกาะ เชื่อมยึดมวลรวมเข้าด้วยกันทำให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกันของคอนกรีตและทำให้คอนกรีตทึบน้ำ หินเป็นมวลรวมหยาบทำหน้าที่เป็นส่วนเติมเต็มในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากเป็นส่วนที่มีขนาดใหญ่และราคาถูก มวลรวมหยาบยังช่วยเพิ่มความเสถียรของปริมาตรและความทนทาน ทรายหรือมวลรวมละเอียดจะทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมหยาบ ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตเป็นผลจากปริมาณซีเมนต์เพสต์ในส่วนผสมและการใช้สารผสมเพิ่ม คุณสมบัติของคอนกรีตขึ้นอยู่กับการควบคุมคุณภาพในทุกขั้นตอนของการผลิตคอนกรีต การกำหนดส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตจึงเป็นจุดเริ่มต้นของการทำงานคอนกรีตที่ต้องให้ความสำคัญ

วิธีการกำหนดส่วนผสมคอนกรีตแบบอัตราส่วนคงที่ (Nominal mix) เป็นวิธีการทำงานที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตขนาดเล็กหรืองานที่มีปริมาณงานไม่มาก ซึ่งมักจะทำการผสมคอนกรีตเองด้วยมือหรือเครื่องผสม วิธีการนี้เป็นวิธีที่ใช้มายาวนาน ข้อกำหนดที่แสดงรายละเอียดการกำหนดส่วนผสมด้วยวิธีการนี้เกิดขึ้นในช่วงทศวรรษ 1930 (Clarke. 2009) หลักการของวิธีการนี้คือเลือกใช้อัตราส่วน (ปูนซีเมนต์:ทราย:หิน) ค่าหนึ่งเพื่อใช้ในการเตรียมปริมาณวัสดุก่อนการผสม ค่าอัตราส่วนจะอยู่ในรูปแบบเลขอัตราส่วนอย่างง่าย เพื่อทำให้เกิดความสะดวกและสามารถใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในโครงการก่อสร้างในการวัดปริมาณวัสดุ การเลือกอัตราส่วนผสมได้จากข้อมูลจากประสบการณ์ หนังสือ ข้อกำหนดของงานก่อสร้างหรือคำแนะนำของผู้ผลิตปูนซีเมนต์ ตัวอย่างเช่นอัตราส่วนที่นิยมใช้ในงานราชการคืออัตราส่วน 1:2:4 สำหรับงานทั่วไปและอัตราส่วน 1:3:5 สำหรับงานคอนกรีตหยาบ (กรมบัญชีกลาง. 2560) เนื่องจากเป็นวิธีการที่เน้นความสะดวกในการทำงาน ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุส่วนผสมจึงนิยมใช้ค่าทั่วไปมากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ จากการสืบค้นข้อมูลในระบบอินเตอร์เน็ตพบว่าข้อมูลเกี่ยวกับการกำหนดส่วนผสมคอนกรีตแบบอัตราส่วนคงที่นี้มีไม่มาก อาจจะเนื่องจากปัจจุบันวิธีการกำหนดส่วนผสมรูปแบบนี้มักจะใช้ในโครงการขนาดเล็กจึงไม่มีการควบคุมคุณภาพของคอนกรีต ในงานที่มีการควบคุมคุณภาพคอนกรีต ผู้รับเหมามักจะนิยมใช้บริการคอนกรีตผสมเสร็จที่มีระบบการควบคุมคุณภาพครบวงจรมากกว่าที่จะทำการผลิตคอนกรีตเอง แบบโครงสร้างของอาคารขนาดเล็กนิยมกำหนดอัตราส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 1:2:4 เป็นหลัก โดยในบางกรณีอาจจะมีการกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำไว้ด้วย เพื่อเป็นการปรับปรุงข้อมูลเกี่ยวกับขั้นตอนการกำหนดส่วนผสมคอนกรีตแบบอัตราส่วนคงที่ ให้เกิดความเข้าใจที่มากขึ้น บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการกำหนดส่วนผสมคอนกรีตแบบอัตราส่วนคงที่จากข้อมูลทั้งในและนอกประเทศ โดยแสดงถึงขั้นตอนของการเลือกส่วนผสมคอนกรีต รวมถึงการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติคอนกรีต ผลลัพธ์ที่คาดหวังคือเพื่อให้เกิดความเข้าใจในวิธีการกำหนดส่วนผสมคอนกรีตแบบอัตราส่วนคงที่และสามารถเลือกใช้หรือปรับอัตราส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น

## 2. ข้อมูลที่เกี่ยวข้องและการวิเคราะห์ผล

### 2.1 รูปแบบการวัดปริมาณส่วนผสมคอนกรีต

การวัดปริมาณที่ถูกต้องของวัสดุส่วนผสมคอนกรีตมีผลต่อความผันแปรของคุณภาพคอนกรีต ขั้นตอนนี้เป็นจุดเริ่มต้นของงานผสมคอนกรีต ซึ่งถ้าสามารถควบคุมได้อย่างถูกต้องจะทำให้ได้คุณภาพคอนกรีตตามที่ต้องการ การชั่งตวงที่

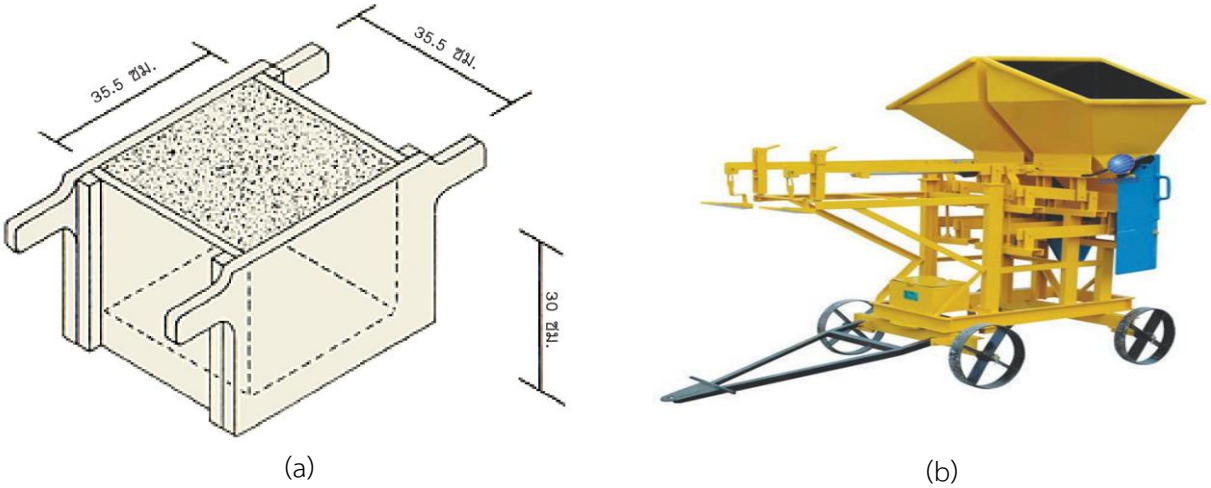
ไม่ดีนั้นมีผลในการเปลี่ยนแปลงคุณภาพคอนกรีตมากกว่าปัจจัยอื่น ๆ ดังนั้นการชั่งตวงจึงเป็นการดำเนินการที่สำคัญมาก ประเภทของการวัดปริมาณส่วนผสมคอนกรีตสามารถทำได้ 2 วิธีคือการตวงปริมาตรและการชั่งน้ำหนัก

2.1.1 การวัดปริมาณส่วนผสมโดยการตวงปริมาตร

เนื่องจากการตวงปริมาตรทำได้ง่ายกว่าการชั่งน้ำหนัก การกำหนดส่วนผสมคอนกรีตแบบอัตราส่วนคงที่เริ่มต้นด้วยการวัดปริมาณวัสดุแบบนี้ วิธีการนี้ยังใช้งานอยู่ในประเทศไทยและหลายประเทศเนื่องจากความสะดวก อุปกรณ์ในการตวงวัดสามารถใช้อุปกรณ์ที่มีในโครงการก่อสร้างเช่นถัง บุ้งกี๋หรือประกอบขึ้นเองจากวัสดุไม้หรือเหล็กในขนาดที่เหมาะสมกับปริมาณงานที่ต้องการ สำหรับงานที่ผสมในปริมาณมากขนาดของถังที่เหมาะสมจะมีขนาดเท่ากับปริมาณปูนซีเมนต์ 1 ถุง ตัวอย่างของถังมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 1 (a) (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2537) ในการทำงานกับเครื่องผสมคอนกรีต ถังเหล่านี้จะใช้สำหรับการตวงทรายและหินเท่านั้น ส่วนปูนซีเมนต์ก็จะทำการผสมทีละ 1 ถุง ในกรณีงานผสมมือหรือปริมาณคอนกรีตไม่มาก มักจะนิยมตวงโดยใช้ถังพลาสติกขนาดประมาณ 5 ลิตร ปัญหาที่อาจพบคือปริมาณส่วนผสมไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการพองตัว/อัดแน่นของส่วนผสม โดยเฉพาะการพองตัว (Bulking) ของทรายเนื่องความชื้นทำให้ต้องมีการเพิ่มปริมาณทรายในส่วนผสม สาเหตุเหล่านี้การตวงปริมาตรจึงถูกแนะนำให้ใช้เฉพาะคอนกรีตกำลังอัดที่ไม่เกิน 15 MPa (Opeyemi J. et al 2018)

2.1.2 การวัดปริมาณส่วนผสมโดยการชั่งน้ำหนัก

ปัจจุบันการผลิตคอนกรีตโดยโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ วัสดุทั้งหมดจะถูกวัดปริมาณโดยน้ำหนัก การกำหนดส่วนผสมคอนกรีตจึงสามารถกำหนดได้อย่างละเอียดมากขึ้น ซึ่งทำให้ได้คุณสมบัติคอนกรีตตรงตามที่ต้องการ ประเทศไทยไม่นิยมใช้วิธีการชั่งน้ำหนักส่วนผสมในการผสมคอนกรีตเอง ข้อกำหนดส่วนผสมคอนกรีตแบบอัตราส่วนคงที่โดยการชั่งน้ำหนักของประเทศอินเดีย (BIS. 2000) แนะนำให้ใช้สำหรับคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดไม่เกิน 16 MPa สำหรับการผสมคอนกรีตในปริมาณมาก การชั่งมวลรวมจะใช้ตาชั่งสำหรับงานคอนกรีตโดยเฉพาะ ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1 (b) (Indiamart. 2019) ข้อดีของการชั่งน้ำหนักคือไม่มีผลกระทบจากผลของการพองตัว/อัดแน่นของมวลรวม การชั่งทำให้สามารถกำหนดปริมาณส่วนผสมได้ละเอียดและวัดปริมาณได้แม่นยำทำให้คุณภาพคอนกรีตสม่ำเสมอมากขึ้น ข้อมูลการทดสอบคอนกรีตเพื่อศึกษาผลของการตวงปริมาตรและการชั่งน้ำหนัก (Olusola K.O. et al 2012) (Opeyemi J. et al 2018) พบว่าคอนกรีตผสมโดยการชั่งน้ำหนักมีค่าการยุบตัวและค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตผสมโดยการตวงปริมาตรในทุกช่วงปริมาณมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์ ผลการทดสอบที่ได้ส่วนหนึ่งเป็นผลจากรูปแบบการชั่งน้ำหนักที่ทำให้ได้ปริมาณส่วนผสมที่แม่นยำกว่าการตวง ซึ่งมีผลกระทบจากการพองตัว/อัดแน่นของส่วนผสม




(a) (b)

**รูปที่ 1** (a) ถังมาตรฐานในการตวงปริมาตรหินและทราย (b) ตาชั่งสำหรับงานคอนกรีตขนาด 500 กก.

**2.2 คุณสมบัติของคอนกรีตจากวิธีอัตราส่วนคงที่**

อัตราส่วนผสมคอนกรีต (ปูนซีเมนต์:ทราย:หิน) มีผลต่อการใช้งานคอนกรีต การเลือกส่วนผสมด้วยวิธีอัตราส่วนคงที่มักจะเลือกจากอัตราส่วนผสมที่เหมาะกับลักษณะงานที่ต้องการ เพื่อให้เห็นถึงภาพรวมของการเลือกใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะกับลักษณะการใช้ประโยชน์ ข้อมูลถูกเลือกมาบางส่วนแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 โดยข้อมูลของประเทศไทยจะเป็นอัตราส่วนผสมโดยปริมาตร (ประณต กุลประสูตร. 2539) (ชัชวาลย์ และคณะ. 2548) (กรมทางหลวง. 2559) (กรมบัญชีกลาง. 2560) ส่วนข้อมูลของต่างประเทศที่แสดงเป็นข้อมูลจากประเทศอินเดีย (BIS. 2000) และประเทศไนจีเรีย (Aginam C.H. et al. 2013) ซึ่งเป็นข้อมูลอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ทั้งสองประเทศมีการใช้อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรด้วยเช่นกัน โดยจะแปลงค่าอัตราส่วนเป็นหน่วยปริมาตรสำหรับงานที่ไม่มีเครื่องชั่ง จากตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมจากข้อมูลทั้งในและนอกประเทศมีลักษณะการใช้ประโยชน์คล้ายกัน อัตราส่วน 1:2:4 เป็นอัตราส่วนที่นิยมใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป อัตราส่วนมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์มีผลต่อลักษณะการใช้ประโยชน์ของคอนกรีต เช่นงานโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและทนทานหรือโครงสร้างที่มีปริมาณเหล็กเสริมจำนวนมาก อัตราส่วนผสมที่ใช้จะมีค่าอัตราส่วนปริมาณมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่าค่าของอัตราส่วนผสมสำหรับงานทั่วไป ซึ่งสัดส่วนปริมาณมวลรวมทั้งหมดที่ลดลงทำให้มีปริมาณซีเมนต์เพสต์ในส่วนผสมที่เพิ่มมากขึ้นและมีผลให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการทำงานที่มากขึ้นทำให้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดและความทนทานที่มากขึ้น

ข้อมูลจากตารางที่ 1 สามารถแบ่งกลุ่มคอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่มคือกลุ่มที่ 1 ปริมาณปูนซีเมนต์สูง (Rich mix) ได้แก่ อัตราส่วน 1:1:1 และ 1:1.5:2 กลุ่มที่ 2 ปริมาณปูนซีเมนต์ปานกลาง (Medium mix) ได้แก่อัตราส่วน 1:1.5:3 1:2:3 และ 1:2:4 กลุ่มที่ 3 ปริมาณปูนซีเมนต์น้อย (Lean mix) ได้แก่อัตราส่วน 1:3:5 1:3:6 และ 1:4:8 ช่วงปริมาณมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์ของทั้ง 3 กลุ่มเท่ากับ 2-4 4-7 และ 8-12 ตามลำดับ อัตราส่วนหินต่อทรายอยู่ในช่วง 1-2 มักจะนิยมกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 เนื่องจากต้องการให้มีปริมาณทรายไปเติมช่องว่างของหินจำนวนหนึ่ง โดยที่มีปริมาณไม่มากเกินไปจนมีผลทำให้ความข้นเหลวลดลง ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสม (Charles E.R. and James C.S. 1988) ในกรณีหินและทรายมีขนาดคละหรือคุณภาพที่ไม่เหมาะสม อาจจะทำการปรับสัดส่วนโดยการเพิ่มขึ้น/ลดลง 0.5 ส่วน เพื่อลด/เพิ่มความข้นเหลวของคอนกรีต แทนที่การเติมน้ำในส่วนผสมที่อาจส่งผลทำให้กำลังและคุณภาพของคอนกรีตลดลง (BIS. 2000)

**ตารางที่ 1** อัตราส่วนผสมและการใช้ประโยชน์

| อัตราส่วนผสม | การใช้ประโยชน์ | | อัตราส่วนมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์ | อัตราส่วนหินต่อทราย |
|---|---|---|---|---|
| | ข้อมูลประเทศไทย | ข้อมูลต่างประเทศ | | |
| 1:1:1 | | โครงสร้างมีเหล็กเสริมปริมาณมาก | 2.0 | 1.0 |
| 1:1.5:2 | โครงสร้างแข็งแรงและทนทาน | คอนกรีตอัดแรง | 3.5 | 1.3 |
| 1:1.5:3 | เสา ถนน โครงสร้างแข็งแรง | คอนกรีตสำเร็จรูป | 4.5 | 2.0 |
| 1:2:3 | เสา โครงสร้างทั่วไป | | 5.0 | 1.5 |
| 1:2:4 | โครงสร้างทั่วไป | โครงสร้างทั่วไป | 6.0 | 2.0 |
| 1:3:5 | คอนกรีตหยาบ | | 8.0 | 1.7 |
| 1:3:6 | คอนกรีตหยาบ | คอนกรีตไม่เสริมเหล็ก | 9.0 | 2.0 |
| 1:4:8 | | คอนกรีตหยาบ | 12.0 | 2.0 |

2.2.1 การประมาณปริมาณส่วนผสมคอนกรีต

การคำนวณปริมาณส่วนผสมจะใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับค่าหน่วยน้ำหนัก ค่าความถ่วงจำเพาะ เพื่อหาค่าน้ำหนักปริมาตรและปริมาตรสมบูรณ์ (Absolute Volume) ค่าคุณสมบัติที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วย ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของปูนซีเมนต์ ทราย หินและน้ำเท่ากับ 3,150 2,650 2,700 และ 1,000 กก/ม$^3$ ตามลำดับ ค่าหน่วยน้ำหนัก (Bulk Unit Weight) ของปูนซีเมนต์ ทราย หินและน้ำเท่ากับ 1,350 1,450 1,500 และ 1,000 กก/ม$^3$ ตามลำดับ ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมเท่ากับร้อยละ 1 คุณภาพหินและทรายอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับงานผสมคอนกรีต ค่าตัวเลขเหล่านี้เป็นค่าที่เลือกใช้จากข้อมูลของประเทศไทยที่มีแนะนำไว้ (ชัชวาลย์ และคณะ. 2548) ในกรณีที่จะทดสอบเพื่อหาค่าที่ถูกต้องสามารถทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C29 C127 C128 และ C188 (ASTM 2018) ผลของข้อมูลจะแสดงผลและอภิปรายเฉพาะข้อมูลอัตราส่วนผสมแบบปริมาตร เนื่องจากเป็นรูปแบบที่นิยมใช้ในประเทศไทย ผลการคำนวณปริมาตรส่วนผสมคอนกรีตของแต่ละอัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2 การแสดงผลในรูปแบบต่อปูนซีเมนต์ 1 ถุง เพื่อให้สะดวกในการใช้งานสำหรับงานขนาดเล็ก ค่าปริมาตรรวมที่แสดงเป็นปริมาณของคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วจากอัตราส่วนผสมที่กำหนด โดยใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดสภาพความข้นเหลวที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 ข้อมูลปริมาณส่วนผสมที่แสดงสามารถใช้ในการประมาณปริมาณส่วนผสม ปูนซีเมนต์ ทรายและหินที่ต้องการใช้งานในการผสมคอนกรีตได้

**ตารางที่ 2** ปริมาณของส่วนผสมและการกำหนดความสามารถในการทำงานของคอนกรีต

| อัตราส่วนผสม | ปริมาณส่วนผสมคอนกรีตต่อปูนซีเมนต์ 1 ถุง | | | | | สภาพความข้นเหลว | ค่าการยุบตัว |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ปูนซีเมนต์ | | ทราย | หิน | ปริมาตรรวม | | |
| | (ถุง) | (%) | (ลบ.ม.) | (ลบ.ม.) | (ลบ.ม.) | | (ซม.) |
| 1:1:1 | 1 | 27.99 | 0.037 | 0.037 | 0.075 | เหลว | 12.5-19.0 |
| 1:1.5:2 | 1 | 18.16 | 0.056 | 0.074 | 0.115 | เหลว | 12.5-19.0 |
| 1:1.5:3 | 1 | 14.70 | 0.056 | 0.111 | 0.139 | ปกติ | 7.5-12.5 |
| 1:2:3 | 1 | 13.44 | 0.074 | 0.111 | 0.153 | ปกติ | 7.5-12.5 |
| 1:2:4 | 1 | 11.44 | 0.074 | 0.148 | 0.179 | ปกติ | 7.5-12.5 |
| 1:3:5 | 1 | 8.84 | 0.111 | 0.185 | 0.228 | ค่อนข้างแห้ง | 2.5-7.5 |
| 1:3:6 | 1 | 7.93 | 0.111 | 0.222 | 0.254 | ค่อนข้างแห้ง | 2.5-7.5 |
| 1:4:8 | 1 | 6.07 | 0.148 | 0.296 | 0.327 | แห้ง | 0-2.5 |

ค่าร้อยละของปูนซีเมนต์ที่แสดงในตารางที่ 2 เป็นค่าปริมาตรสมบูรณ์ (Absolute volume) ของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ค่านี้ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อแสดงถึงปริมาตรของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมว่ามีมากน้อยอย่างไร โดยทั่วไปคอนกรีตที่ออกแบบตามมาตรฐานปกติจะมีปริมาตรปูนซีเมนต์ในส่วนผสมอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 (PCA. 2019) จากข้อมูลกลุ่มของคอนกรีตที่จำแนกตามช่วงอัตราส่วนปริมาณมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์ในหัวข้อ 2.2 พบว่ากลุ่มที่ 1 ถึง 3 มีค่าปริมาตรสมบูรณ์ของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 18-28 11-15 และ 6-9 ตามลำดับ ค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่ากลุ่มที่ 2 ปริมาณปูนซีเมนต์ปานกลางมีปริมาณปูนซีเมนต์ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ออกแบบตามมาตรฐานปกติ ข้อมูลที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 1 ที่คอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปานกลางนิยมใช้สำหรับงานทั่วไป

2.2.2 ความสามารถในการทำงานของคอนกรีต

ความสามารถในการทำงาน (Workability) ของคอนกรีตเป็นเรื่องพื้นฐานอย่างหนึ่งของคนทำงานด้านคอนกรีตต้องเข้าใจ โดยเป็นปัจจัยหนึ่งในการตัดสินใจเลือกส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ต้องการ ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตพิจารณาจากความข้นเหลว (Consistency) ของคอนกรีตที่ได้หลังจากการผสมเสร็จแล้ว ซึ่งความข้นเหลวเป็นผลมาจากหลายปัจจัยเช่นชนิดของปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำ ชนิดของมวลรวม รวมถึงปริมาณมวลรวมในส่วนผสม สำหรับคอนกรีตทั่วไปนิยมใช้การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump cone test) ในการตรวจสอบสภาพความข้นเหลว สภาพความข้นเหลวและช่วงของค่าการยุบตัวแสดงในตารางที่ 2 เป็นการกำหนดขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับกลุ่มคอนกรีตที่แบ่งตามปริมาณมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์และลักษณะการใช้ประโยชน์ตามตารางที่ 1 ช่วงสภาพความข้นเหลวและช่วงของค่าการยุบตัวนี้กำหนดโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ACI 211.3R-2 (ACI Committee 211. 2002) ประกอบด้วยช่วงเหลว (Very plastic) ช่วงปกติ (Plastic) ช่วงค่อนข้างแห้ง (Stiff plastic) และช่วงแห้ง (Stiff) การกำหนดช่วงความข้นเหลวปกติที่มีช่วงค่ายุบตัวเท่ากับ 7.5-12.5 ซม. สำหรับคอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปานกลางถือว่าเพียงพอสำหรับการผสมในงานขนาดเล็กที่อาจจะผสมด้วยมือและการทำให้แน่นอาจจะใช้การกระทุ้ง ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ต่ำ ส่วนคอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์น้อยประกอบด้วยอัตราส่วน 1:3:5 1:3:6 และ 1:4:8 จะมีความข้นเหลวในช่วงค่อนข้างแห้งและช่วงแห้ง สภาพคอนกรีตของช่วงเหล่านี้จะมีลักษณะการผสมและการเทลงแบบที่ยากขึ้นตามลำดับ ผลจากอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณมวลรวมมากทำให้ผิวคอนกรีตอาจจะมีหินโผล่หรือเกิดโพรงในบริเวณที่ทำการอัดแน่นไม่เพียงพอ

2.2.3 การกำหนดปริมาณน้ำและการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีต

ปริมาณปูนซีเมนต์ หินและทรายสามารถคำนวณจากอัตราส่วนผสมที่กำหนดจากตารางที่ 1 และค่าคุณสมบัติวัสดุส่วนผสมในหัวข้อ 2.2.1 ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อทำการคำนวณปริมาณส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร น้ำในส่วนผสมทำหน้าที่ผสมกับปูนซีเมนต์ตามหลักปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เคลือบมวลรวม ปริมาณน้ำส่วนที่เหลือเป็นส่วนทำให้คอนกรีตมีสภาพข้นเหลวที่เพียงพอต่อการทำงานที่ต้องการ การเลือกปริมาณน้ำที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดของหิน ความข้นเหลวหรือค่าการยุบตัวที่ต้องการ โดยค่าปริมาณน้ำในส่วนผสมที่แนะนำไว้สำหรับหินขนาด 20 มม. ตามมาตรฐาน ACI 211.3R-2 (ACI Committee 211. 2002) ประกอบด้วยช่วงแห้ง ช่วงค่อนข้างแห้ง ช่วงปกติและช่วงเหลวเท่ากับ 168-178 178-186 186-202 และ 202-213 กก/ม$^3$ ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ปริมาณน้ำของแต่ละกลุ่มคอนกรีตที่มีค่าช่วงค่าการยุบตัวช่วงเดียวกันจะถูกกำหนดให้มีปริมาณน้ำที่ใกล้เคียงกัน ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3 โดยค่าปริมาณน้ำที่แสดงเป็นปริมาณน้ำที่รวมผลของการดูดซึมน้ำของมวลรวมแล้ว การประมาณค่ากำลังอัดจะคำนวณจากสมการ (1) (Popovics S. and Ujheyi J. 2008) ค่ากำลังอัดในสมการที่ใช้ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำและปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม สมการนี้ถูกเลือกมาใช้เนื่องจากสอดคล้องกับการกำหนดส่วนผสมด้วยวิธีนี้ ซึ่งปริมาณปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับการเพิ่มลดปริมาณมวลรวมในส่วนผสม สำหรับคอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์สูงอาจจะมีปริมาณปูนซีเมนต์ส่วนเกินที่ไม่ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัด ตัวแปรของสมการประกอบด้วยค่า f คือค่ากำลังอัด (MPa) ค่า w คือค่าปริมาณน้ำ (กก/ม$^3$) ค่า C คือค่าปริมาณปูนซีเมนต์ (กก/ม$^3$)

$$f = \frac{353.72}{23.695^{\left(\frac{w}{c}+0.000636c\right)}} \qquad (1)$$

จากตารางที่ 3 ปริมาณน้ำโดยปริมาตรสำหรับปูนซีเมนต์ 1 ส่วนสามารถกำหนดดังนี้ คอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์สูงอยู่ในช่วง 0.50-0.75 ส่วน คอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปานกลางอยู่ในช่วง 0.80-1.00 ส่วน และคอนกรีต

กลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์น้อยอยู่ในช่วง 1.25-1.75 ส่วน โดยปริมาณน้ำที่ใช้จริงอาจจะต้องมีการปรับเพิ่มลดขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของมวลรวมที่ใช้ผสม ข้อมูลปริมาณน้ำของผู้ผลิตปูนซีเมนต์ที่แนะนำไว้สำหรับคอนกรีตงานทั่วไป อัตราส่วน 1:2:3 เท่ากับ 0.75 ส่วน (ปูนซีเมนต์นครหลวง. 2562) และอัตราส่วน 1:2:4 เท่ากับ 0.50–1.00 ส่วน (วัสดุก่อสร้างเอสซีจี. 2562) ข้อมูลนี้เมื่อเทียบกับช่วงค่าที่กำหนดสำหรับคอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปานกลางจะพบว่ามีความสอดคล้องกัน ส่วนค่าที่ผู้ผลิตปูนซีเมนต์แนะนำไว้สำหรับคอนกรีตหยาบ อัตราส่วน 1:3:4 (ปูนซีเมนต์นครหลวง. 2562) และอัตราส่วน 1:3:5 (วัสดุก่อสร้างเอสซีจี. 2562) เท่ากับ 0.75 และ 1.00 ส่วนตามลำดับ ค่าทั้งสองเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดสำหรับคอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์น้อย สาเหตุค่าปริมาณน้ำที่แนะนำของผู้ผลิตปูนซีเมนต์มีค่าที่น้อยกว่าอาจจะเป็นผลของการเผื่อความชื้นของมวลรวม ปริมาณน้ำที่กำหนดต่างกันสำหรับงานคอนกรีตหยาบ อาจจะไม่ส่งผลต่อลักษณะคอนกรีตที่ต้องการมากนัก เนื่องจากใช้เพื่อการรองพื้นเท่านั้น

**ตารางที่ 3** ปริมาณส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรและค่ากำลังอัดโดยประมาณ

| อัตราส่วนผสม | ปริมาณส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร | | | | อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ | ค่ากำลังอัดโดยประมาณ (กก/ซม$^2$) | ค่าประสิทธิภาพ/อันดับประสิทธิภาพ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ปูนซีเมนต์ (กก/ม$^3$) | ทราย (กก/ม$^3$) | หิน (กก/ม$^3$) | น้ำ (กก/ม$^3$) | | | |
| 1:1:1 | 673.73 | 723.64 | 748.59 | 235.81 | 0.35 | 307.24 | 2.19 / 6 |
| 1:1.5:2 | 435.08 | 700.96 | 966.84 | 239.29 | 0.55 | 263.77 | 1.65 / 3 |
| 1:1.5:3 | 359.72 | 579.55 | 1,199.06 | 223.03 | 0.62 | 245.98 | 1.46 / 1 |
| 1:2:3 | 328.67 | 706.02 | 1,095.56 | 223.49 | 0.68 | 216.57 | 1.52 / 2 |
| 1:2:4 | 279.79 | 601.03 | 1,243.51 | 223.83 | 0.80 | 163.47 | 1.71 / 4 |
| 1:3:5 | 219.74 | 708.04 | 1,220.75 | 210.95 | 0.96 | 111.19 | 1.98 / 5 |
| 1:3:6 | 197.14 | 635.24 | 1,314.29 | 210.94 | 1.07 | 82.16 | 2.40 / 7 |
| 1:4:8 | 153.12 | 657.85 | 1,361.08 | 199.06 | 1.30 | 43.36 | 3.53 / 8 |

2.2.4 การวิเคราะห์ผลข้อมูลและประสิทธิภาพของอัตราส่วนผสม

จากตารางที่ 3 ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์ลดลงทำให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่คำนวณจากปริมาณน้ำที่กำหนดจากข้อ 2.2.3 มีค่าที่ลดลงเช่นกัน ค่ากำลังอัดโดยประมาณที่แสดงในตารางที่ 3 เป็นเพียงค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เท่านั้น ความถูกต้องของค่ากำลังอัดจากสมการอาจจะต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมในห้องปฏิบัติการ ข้อมูลค่ากำลังอัดที่แสดงพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดและค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่แนะนำไว้ของ PCA (Kosmatka Steven H. and Wilson Michelle L. 2011) กับข้อมูลในตารางที่ 3 พบว่ามีความสอดคล้องกัน ยกเว้นคอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์สูงที่มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าค่าที่แนะนำ เหตุผลอาจจะเกิดจากการกำหนดให้คอนกรีตกลุ่มนี้มีค่าการยุบตัวที่สูงกว่าทำให้มีปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่ากลุ่มอื่น ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานของ

คอนกรีตมากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัด โดยค่ากำลังอัดจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม (Popovics S. and Ujheyi J. 2008) (Wassermann R. et al. 2009)

ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมขั้นต่ำมักจะถูกกำหนดไว้สำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการคุณสมบัติด้านทนทาน (BIS. 2000) (ACI Committee 350. 2006) ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่มากเกินไปมีผลต่อความทนทานของคอนกรีตเช่นการหดตัวเพิ่มขึ้น (Wassermann R. et al. 2009) ในบางกรณีปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำในส่วนผสมจะถูกกำหนดไว้เพื่อให้มั่นใจว่าคอนกรีตจะมีปริมาณเพสต์เพียงพอต่อการทำงาน ตัวอย่างเช่นงานพื้น (ACI Committee 302. 2004) ควรมีปริมาณวัสดุซีเมนต์ประสานในส่วนผสมอยู่ในช่วง 320-375 กก/ม$^3$ เพื่อให้มีความสามารถในการตกแต่งผิวหน้าคอนกรีต (Finishability) ที่เพียงพอ ปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำในส่วนผสมอาจจะถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นในกรณีไม่ได้ทดสอบคุณสมบัติวัสดุส่วนผสม ตัวอย่างเช่นข้อกำหนดของประเทศไทย มาตรฐาน มยผ.1101 (กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2552) กำหนดให้สำหรับคอนกรีตที่ไม่ได้ทดสอบคุณสมบัติวัสดุส่วนผสมให้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำ 290 300 320 กก/ม$^3$ สำหรับคอนกรีตชนิด ค1 ค2 ค3 และมีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 150 180 210 กก/ซม$^2$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลส่วนนี้เทียบกับตารางที่ 3 จะพบว่า อัตราส่วนผสม 1:2:4 มีปริมาณปูนซีเมนต์และค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตชนิด ค1 ส่วนอัตราส่วนผสม 1:2:3 มีปริมาณปูนซีเมนต์และค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตชนิด ค3 ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของอัตราส่วนนี้อยู่ในช่วงที่แนะนำไว้สำหรับงานพื้นของ ACI 302 และเพียงพอสำหรับความต้องการด้านความทนทาน

ข้อมูลของกรมบัญชีกลาง (กรมบัญชีกลาง. 2560) ปริมาณส่วนผสมของอัตราส่วนผสม 1:2:4 มีค่าที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตชนิด ค4 ซึ่งมีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 240 กก/ซม$^2$ เมื่อเปรียบข้อมูลกับตารางที่ 3 พบว่าค่าปริมาณส่วนผสมปูนซีเมนต์ ทรายและหินของกรมบัญชีกลางมีค่าที่สูงกว่า เหตุผลอาจเกิดจากการเผื่อปริมาณตามหลักการประมาณราคาและการใช้ค่าคุณสมบัติส่วนผสมในการคำนวณที่ไม่ตรงกัน ค่าปริมาณน้ำของกรมบัญชีกลางกำหนดไว้เท่ากับ 180 กก/ม$^3$ ค่าปริมาณน้ำนี้เมื่อคำนวณเป็นอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่กำหนดไว้ เมื่อพิจารณาด้านความสามารถในการทำงานของคอนกรีต จากข้อมูลในหัวข้อ 2.2.3 จะพบว่าปริมาณน้ำที่ 180 กก/ม$^3$ อยู่ในช่วงความข้นเหลวค่อนข้างแห้ง ค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 2.5-7.5 ซม ซึ่งทำให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตไม่เพียงพอสำหรับการเทงานโครงสร้างอาคารเช่นเสา คานและกำแพง คอนกรีตอาจจะเหมาะสมสำหรับใช้ในงานพื้นหรือถนนเท่านั้น (ชัชวาลย์ และคณะ. 2548) ในกรณีที่มีการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานคอนกรีตที่ได้อาจจะมีคุณภาพที่ลดลงทำให้ไม่ได้กำลังอัดที่กำหนดไว้

ค่าประสิทธิภาพที่แสดงในตารางที่ 3 เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินถึงประสิทธิภาพของอัตราส่วนผสม โดยพิจารณาจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่ทำให้เกิดค่ากำลังอัด 1 กก/ซม$^2$ หรืออัตราส่วนของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อค่ากำลังอัด ค่าอัตราส่วนที่ยิ่งน้อยแสดงว่าส่วนผสมคอนกรีตมีประสิทธิภาพสูง ค่าอัตราส่วนนี้สามารถใช้ในการปรับแต่งอัตราส่วนผสมให้ได้ค่ากำลังอัดที่เหมาะสมกับงาน โดยมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่ไม่มากเกินไป เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมที่มีราคาแพงและมีผลกระทบต่อทางสิ่งแวดล้อมสูง ผลการจัดเรียงอันดับค่าประสิทธิภาพในตารางที่ 3 จะพบว่าคอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปานกลางเป็นกลุ่มที่มีค่าประสิทธิภาพสูง โดยอัตราส่วนผสม 1:1.5:3 และ 1:2:3 มีค่าประสิทธิภาพที่สูงสุดสองอันดับแรก เมื่อทำการวิเคราะห์ผลค่าประสิทธิภาพ รวมถึงความสามารถในการทำงาน ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมและค่ากำลังอัดจะพบว่าอัตราส่วนผสม 1:2:3 เหมาะสำหรับการใช้งานสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป โดยใช้ทดแทนอัตราส่วนผสม 1:2:4 ที่ความสามารถในการทำงานอาจจะไม่เพียงพอ ส่วนอัตราส่วนผสม 1:1.5:3 เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น สำหรับงานคอนกรีตหยาบควรใช้อัตราส่วนผสม 1:3:5 ในกรณีต้องการเพิ่มความสามารถในการทำงานของคอนกรีตโดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำ สามารถทำได้โดยการลดอัตราส่วนผสมหินลงไป 0.5-1 ส่วน ตัวอย่างของการปรับลด

ในตารางที่ 3 ในส่วนของอัตราส่วนผสม 1:2:3 และ 1:2:4 หรือ 1:3:5 และ 1:3:6 จะพบว่าการลดอัตราส่วนหินลงมีผลทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นและค่ากำลังอัดเพิ่มมากขึ้น

**3. สรุปผล**

รูปแบบการวัดปริมาณส่วนผสมมีผลต่อความสามารถในการทำงานและค่ากำลังอัดของคอนกรีต ขั้นตอนของการกำหนดส่วนผสมแบบอัตราส่วนคงที่ประกอบด้วย กำหนดอัตราส่วนผสมจากลักษณะการใช้ประโยชน์ กำหนดความข้นเหลวของคอนกรีตหรือช่วงค่าการยุบตัวโดยใช้อัตราส่วนมวลรวมทั้งหมดต่อปูนซีเมนต์ กำหนดปริมาณน้ำในส่วนผสมจากช่วงค่าการยุบตัว คุณสมบัติของส่วนผสมที่ต้องใช้ในการคำนวณคือค่าความถ่วงจำเพาะและค่าหน่วยน้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่สูงขึ้นมีผลต่อความสามารถในการทำงาน แต่อาจจะไม่ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัด คอนกรีตกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปานกลางมีค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุด อัตราส่วนผสม 1:2:3 เหมาะสมสำหรับงานทั่วไปและอัตราส่วนผสม 1:1.5:3 เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนคอนกรีตหยาบควรใช้อัตราส่วนผสม 1:3:5 การปรับลดสัดส่วนปริมาณหินในส่วนผสมมีผลทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานเพิ่มขึ้นและค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น

**4. กิตติกรรมประกาศ**

ผู้เขียนขอขอบคุณ ภาควิชาการออกแบบและบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือ ส่งเสริมและสนับสนุนการทำงานมาโดยตลอด

**5. เอกสารอ้างอิง**

กรมทางหลวง. 2559. **วิธีการคำนวณราคาต้นทุนงานคอนกรีต Class ต่าง ๆ ของกรมทางหลวงเพิ่มเติม**. http://maintenance.doh.go.th/website/download/manual59/manual_calculate_concrete.pdf (20 พฤษภาคม 2562)

กรมบัญชีกลาง. 2560. **หลักเกณฑ์การคำนวณราคากลางงานก่อสร้างอาคาร**. น.143. http://rakaklang.yotathai.com (20 พฤษภาคม 2562)

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2552. **มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก**. มยผ.1101-52. มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง. กระทรวงมหาดไทย. กรุงเทพฯ. น. 8-12. http://subsites.dpt.go.th/edocument/index.php/sd-work/4-2017-04-03-02-26-37

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2537. การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต. **คอนกรีตเทคโนโลยี**. บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (CPAC). น. 85. http://cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/e-contech_u18.pdf (20 พฤษภาคม 2562)

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร และคณะ. 2548. **ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน**. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม. http://www.cpacacademy.com/s0103/index.php?pgid=index (20 พฤษภาคม 2562)

ประณต กุลประสูตร. 2539. ส่วนผสมของคอนกรีต. **ข่าวช่าง**. http://library.dip.go.th/multim/edoc/02837.pdf (20 พฤษภาคม 2562)

ปูนซีเมนต์นครหลวง. 2562. **อินทรีเพชร.** https://www.siamcitycement.com/stocks/media/0016a6.pdf (20 พฤษภาคม 2562)

วัสดุก่อสร้างเอสซีจี. 2562. **ปูนโครงสร้างเอสซีจี.** https://www.scgbuildingmaterials.com/th/cmsresource/productapplicationmedia/3332/applicationdoc/leaflet_scg_type1_ap18365.pdf (20 พฤษภาคม 2562)

ACI Committee 211. 2002. **Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete**. ACI 211.3R-02. American Concrete Institute, Detroit, pp. 211.3R-2 - 211.3R-3.

ACI Committee 302. 2004. **Guide for Concrete Floor and Slab Construction**. ACI 302.1R-04. American Concrete Institute, Detroit, pp. 302.1R-29.

ACI Committee 350. 2006. **Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary**. ACI 350-06. American Concrete Institute, Detroit, pp. 47.

Aginam C. H., Umenwaliri S. N. and Nwakire, C. 2013. Influence of Mix Design Methods on the Compressive Strength of Concrete. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**. Vol. 8. No. 6. pp. 440. https://www.researchgate.net/publication/283382902_Influence_of_mix_design_methods_on_the_compressive_srength_of_concrete (20 พฤษภาคม 2562)

ASTM Committee. 2018. Section: 4 Construction. **Concrete and Aggregates**. Volume 04.02. Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.

BIS - Bureau of Indian Standards. 2000. **Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice**. IS 456:2000. 4th revision. New Delhi. India. http://www.iitk.ac.in/ce/test/IS-codes/is.456.2000.pdf (20 พฤษภาคม 2562)

Charles E. Reynolds and James C. Steedman. 1988. **Reinforced Concrete Designer's Handbook**. 10th Edition, E & FN SPON. Taylor & Francis Group. pp. 38.

Clarke, J.L. 2009. **Historical Approaches to the Design of Concrete Buildings and Structures**. The Concrete Society Technical Report TR70. Camberley. The Concrete Society. pp. 10-22.

Indiamart. 2019. **Concrete Weigh Batcher**. https://www.indiamart.com/proddetail/concrete-weigh-batcher-9861764162.html (20 พฤษภาคม 2562)

Kosmatka Steven H. Wilson Michelle L. 2011. **Design and control of concrete mixtures**. 15th edition. Portland Cement Association – PCA. Illinois. U.S.A. pp. 235.

Olusola K.O. Babafemi A.J. Umoh A.A. Olawuyi B.J. 2012. Effect of Batching Methods on the Fresh and Hardened Properties of Concrete. **International Journal of Recent Research and Applied Studies**. vol.13:13. https://www.arpapress.com/Volumes/Vol13Issue3/IJRRAS_13_3_13.pdf (20 พฤษภาคม 2562)

Opeyemi J. Olabosipo I. F. Kolapo O.O. Shunanum J.S. 2018. A Comparative Analysis of Batching by Weight and Volume towards Improved Concrete Production. **Construction Research Congress 2018.** Asce Library. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784481295.058 (20 พฤษภาคม 2562)

PCA - Portland Cement Association. 2019. **How Concrete is Made.** https://www.cement.org/cement-concrete-applications/how-concrete-is-made (20 พฤษภาคม 2562)

Popovics S. Ujheyi J. 2008. Contribution to the Concrete Strength Versus Water-Cement Ratio Relationship **Journal of Materials in Civil Engineering**. 20 (7). pp 459–463.

Wassermann R., Katz A. and Bentur A. (2009). Minimum Cement Content Requirements: A Must or a Myth?. **Material and Structures**. (42)7. pp. 973-982.