

การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

A Study of Optimal Proportion of Factors in Concrete Ready Mixed Process using Factorial Experiment

มนนัช พระพุทธรักษ์¹ และ วีระเดช วุฒิพรพันธ์^{2*}

Kananath Praputtakun¹ and Teeradej Wuttiornpun^{2*}

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง การผลิตคอนกรีตผสมเสร็จนั้นมีปัญหาที่สำคัญอยู่ประการหนึ่งคือ คอนกรีตที่ผลิตด้วยส่วนผสมปัจจุบันมีการรับแรงอัดได้ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด จากปัญหาดังกล่าวทางโรงงานตัวอย่างจึงแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มปูนซีเมนต์โดยเฉลี่ยประมาณ 80 กิโลกรัมต่อการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ลงในการผสมคอนกรีตแต่ละครั้ง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีตเพื่อรับแรงอัดในช่วง 240 ถึง 260 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์เท่าเดิม ผู้วิจัยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งประกอบด้วย 4 ปัจจัยหลักได้แก่ ขนาดของหิน ขนาดของทราย อัตราส่วนผสมมวลรวม และระยะเวลาการบ่มคอนกรีต โดยทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 6 ครั้ง และใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ผลการศึกษาพบว่าทุกปัจจัยมีผลต่อการรับแรงอัดคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.001$) และสัดส่วนที่เหมาะสม

สำหรับการผลิตคอนกรีตดังกล่าว ได้แก่การใช้หินขนาด 1 นิ้ว ใช้ทรายชนิดหยาบ ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างหินกับทรายเป็น 42% ต่อ 58% โดยน้ำหนัก และใช้เวลาในการบ่มคอนกรีตเท่ากับ 7 วัน จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้โรงงานสามารถผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่รับแรงอัดในช่วง 240 ถึง 260 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรได้โดยใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์เท่าเดิมตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

คำสำคัญ: คอนกรีตผสมเสร็จ การทดลองเชิงแฟกทอเรียล

Abstract

Concrete ready mixed industry has consistently grown over years. However, a problem frequently found is that strength of concrete produced by the standard proportion is always lower than standard specification. Thus, a selected factory solves this problem by adding cements higher than the existing proportion about 80 kgs for every 1 m³ which directly

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* Corresponding Author, Tel. 0-2913-2500 Ext. 8141, E-mail: teeradejw@kmutnb.ac.th

impacts on increasing of production costs. A purpose of this study is to determine an optimal proportion of producing concrete's strength between 240 to 260 Kg/cm² by using the same amount of cements. A general factorial experiment is then conducted in order to determine the optimal proportion of four factors, namely, sizes of rock, sizes of sand, ratio between rock and sand, and ripeness time. Each experiment is performed by 6 replicates at 95% confidence interval. The result indicates that all factors have significantly affected on the concrete's strength. The optimal proportion to produce the concrete's strength between 240 to 260 kg/cm² is to use 1 inch of rock size, coarse sand, ratio between rock and sand is 42%: 58% (by weight), and ripeness time is 7 days. Based on the experimental result, the selected factory can produce concrete with strength between 240 to 260 kg/cm² by using the same amount of cements as expected.

Keywords: Concrete Ready Mixed, Factorial Design

1. บทนำ

ในสภาวะปัจจุบันทุกๆ องค์การย่อมต้องมีการปรับปรุงการผลิตอย่างต่อเนื่องเพื่อความอยู่รอดทางธุรกิจ ตลอดจนสามารถแข่งขันกับคู่แข่งในตลาดได้ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ธุรกิจประสบผลสำเร็จคือ การผลิตสินค้าที่มีคุณภาพเป็นที่น่าเชื่อถือ และต้นทุนการผลิตต่ำ ดังนั้นการปรับปรุงและการศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนในกระบวนการผลิตจึงเป็นอีกกิจกรรมหนึ่งที่องค์กรไม่ควรมองข้ามจากการศึกษาสภาพปัญหาของโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จแห่งหนึ่ง พบว่าทางโรงงานได้ประสบปัญหาเรื่องคอนกรีตที่ผลิตออกมาด้วยส่วนผสมมาตรฐานมีการรับแรงอัดได้ต่ำกว่าที่ต้องการ และวิธีการแก้ปัญหาในปัจจุบันที่ทางโรงงานกระทำอยู่คือการเพิ่มสัดส่วนปูนซีเมนต์ให้มากขึ้นจากมาตรฐานลงในการผลิตคอนกรีตแต่ละครั้ง

เฉลี่ยประมาณ 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในปี 2552 ทางโรงงานมียอดการผลิตเฉลี่ยประมาณ 37 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็นต้นทุนส่วนเผื่อปูนซีเมนต์ประมาณ 7 ล้านบาท การแก้ไขด้วยวิธีดังกล่าวทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตให้รับแรงอัดได้ตามที่กำหนดโดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่าเดิม ผู้วิจัยเริ่มจากการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งได้จากการระดมความคิดเห็นและวิเคราะห์จากทีมงานผู้มีประสบการณ์และความเชี่ยวชาญในกระบวนการผลิตคอนกรีตของโรงงาน จากการวิเคราะห์พบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้คอนกรีตมีการรับแรงอัดต่ำกว่าข้อกำหนดมีอยู่ 4 ประการ ได้แก่

1. ปัจจุบันทางโรงงานใช้เพียงสัดส่วนมวลรวมระหว่าง หินและทราย (น้ำหนักของหิน:น้ำหนักของทราย) ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำ และระยะเวลาในการบ่ม เป็นตัวกำหนดสูตรการผลิต แต่เนื่องจาก หินและทราย ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดมีหลายขนาดและทางโรงงานไม่ได้มีการกำหนดอย่างชัดเจนว่าจะต้องใช้ หิน หรือทราย ขนาดเท่าใดในการผลิตคอนกรีต ดังนั้นในการผลิตแต่ละครั้งจึงมีหินและทรายหลายๆ ขนาดผสมกันอยู่

2. ปัจจุบันทางโรงงานได้มีการกำหนดสัดส่วนในการผสมหินและทราย จำนวน 3 รูปแบบ จากการตรวจสอบพบว่าพนักงานของบริษัทไม่ได้ตรวจสอบน้ำหนักของหินและทรายให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ และเครื่องชั่งน้ำหนักไม่ได้รับการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ส่วนผสมดังกล่าวไม่ถูกต้อง

3. ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำ จากการตรวจสอบพบว่ามีการควบคุมปริมาณของปูนซีเมนต์และน้ำอย่างชัดเจนและเชื่อถือได้ จึงสามารถตัดประเด็นนี้ออกได้

4. ปัจจุบันโรงงานใช้ระยะเวลาในการบ่มมาตรฐานอยู่ 2 ระยะ ได้แก่ 7 วัน และ 28 วัน จากการตรวจสอบพบว่าพนักงานใช้ประสบการณ์และการประเมินคร่าวๆ แทนการใช้ระยะเวลาบ่มมาตรฐาน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อ

การรับแรงอัดของคอนกรีต

จากการวิเคราะห์ปัญหาข้างต้น ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยให้มีการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักอย่างสม่ำเสมอ เสนอให้มีการอบรมพนักงานให้ตรวจสอบน้ำหนักของหินและทรายก่อนการผลิตให้ถูกต้อง และให้มีการจับเวลาในการบ่มให้ถูกต้องตามที่กำหนด และเนื่องจากหินและทรายที่มีขายอยู่นั้นมีหลายขนาด ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของหินและทรายขนาดต่างๆ เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตให้มีการรับกำลังอัดตามที่ลูกค้าต้องการโดยไม่ต้องมีการเพิ่มปูนซีเมนต์ให้มากขึ้นอีกต่อไป

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอัตราส่วนผสมคอนกรีตผสมเสร็จพบว่าในปี 1996 Neville [1] ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดคอนกรีตโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผลจากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการรับแรงอัดคอนกรีตคือปูนซีเมนต์ หิน และทราย ต่อมาในปี 2001 Soudki, Salakawy & Elkum [2] ได้ศึกษาอัตราส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมภายใต้ภูมิอากาศเขตร้อน โดยเพิ่มปัจจัยด้านอุณหภูมิขึ้นนี้อีก 1 ปัจจัยและใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟกทอเรียล (Full Factorial Design) โดยแบ่งปัจจัยออกเป็น 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มี 3 ระดับ (0.4, 0.5, 0.6) อัตราส่วนมวลรวมมี 4 ระดับ (0.55, 0.6, 0.65, 0.7) อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์มี 4 ระดับ (3, 4, 5, 6) และความแตกต่างของอุณหภูมิมี 3 ระดับ (24, 38, 52 องศาเซลเซียส) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาระดับของปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสม ผลจากการวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยคือที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 อัตราส่วนมวลรวมเท่ากับ 0.55 ถึง 0.60 อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.50 ถึง 3.65 ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

เท่ากับ 0.40 อัตราส่วนมวลรวมเท่ากับ 0.55 อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.45 ถึง 3.55 และที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียสอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 อัตราส่วนมวลรวมเท่ากับ 0.55 ถึง 0.60 อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.00 ถึง 3.50

นอกจากนี้ในปี 2003 Simon [3] ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมคอนกรีตในการก่อสร้างพื้นผิวถนนโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับแบบ 3 ปัจจัย (2^3 Factorial Design) โดยกำหนดปัจจัยต่างๆ ดังนี้ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนมวลรวม และอัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์ ผลจากการทดลองพบว่าช่วงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อยู่ที่ 0.40 ถึง 0.43 อัตราส่วนมวลรวมอยู่ที่ 0.61 และอัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์อยู่ที่ 4.3 ถึง 5.1 ในปี 2006 Ahmad [4] ทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยมีจุดประสงค์เพื่อผลิตคอนกรีตให้มีความแข็งแรงมากที่สุด โดยกำหนดปัจจัยต่างๆ คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 อัตราส่วนมวลรวมหยาบคือ 0.62 และ 0.72 อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์คือ 4.46, 4.66, 4.88, 5.17, 5.41 และ 5.67 โดยทดสอบกำลังอัดที่บ่ม 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟกทอเรียล (Full Factorial Design) ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 อัตราส่วนมวลรวมหยาบเท่ากับ 0.62 และอัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 4.88 จะทำให้คอนกรีตที่ผลิตออกมามีความแข็งแรงมากที่สุด และในปี 2007 Saikaew [5] ได้ศึกษาอัตราส่วนของคอนกรีตที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนแบบ (2^{k-p} Fractional Factorial Design) โดยแบ่งปัจจัยหลักออกเป็น 6 ปัจจัยโดยแต่ละปัจจัยมีด้วยกัน 2 ระดับ ได้แก่ ปริมาณปูนซีเมนต์ (11 kg, 13 kg) ปริมาณซีเมนต์ (3 kg, 5 kg) ปริมาณมวลรวมหยาบ (10 kg, 15 kg) ปริมาณมวลรวมละเอียด (15 kg, 45 kg) ปริมาณทราย (0 kg, 30 kg) และปัจจัยสุดท้ายคือ ปริมาณน้ำยาผสมเพิ่ม (140 cc, 180 cc.) โดยมีวัตถุประสงค์

เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มกำลังคอนกรีต ผลจากการวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่าปัจจัยของปริมาณทรายกับปัจจัยของปริมาณมวลรวมแบบละเอียดส่งผลต่อกำลังคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นสรุปได้ว่าการออกแบบการทดลองนั้นสามารถวิเคราะห์และกำหนดอัตราส่วนผสมคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จะเห็นได้ว่าผลที่ได้ในแต่ละงานวิจัยนั้นมีความแตกต่างกันซึ่งอาจเกิดจากวัตถุดิบที่หาได้ในแต่ละประเทศมีขนาดไม่เหมือนกันรวมถึงสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน [4] ด้วยเหตุนี้เองผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำวิธีการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้กับโรงงานกรณีศึกษาเพื่อศึกษาและกำหนดขนาดและอัตราส่วนผสมของหินและทรายที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม และราคาวัตถุดิบของทางโรงงาน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ขนาดของหิน ขนาดของทราย สัดส่วนผสมระหว่างหินและทราย รวมถึงระยะเวลาการบ่ม เพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานในการเลือกขนาดและอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมให้กับโรงงานฯ ต่อไป

3. การออกแบบการทดลอง

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะอธิบายถึงวิธีการออกแบบการทดลอง โดยผู้วิจัยได้แบ่งตัวแปรการทดสอบออกเป็น 2 ตัวแปรได้แก่ ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ตัวแปรอิสระ

ในการออกแบบการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์สาเหตุร่วมกับทีมวิศวกรและผู้มีประสบการณ์ทางด้านการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตของทางโรงงานกรณีศึกษา เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการรับแรงอัดของคอนกรีต ตารางที่ 1 แสดงการจำแนกปัจจัยและระดับที่มีผลกระทบต่อการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งในการกำหนดปัจจัยต่างๆ ที่จะใช้ในการทดลองนั้น ผู้วิจัยได้อ้างอิงจากขนาดของหิน

และทรายที่มีขายอยู่ในท้องตลาด ส่วนสัดส่วนในการผสมระหว่างหินและทรายและระยะเวลาในการบ่มนั้นทางโรงงานตัวอย่างได้ กำหนดให้ผู้วิจัยใช้ข้อมูลตามปัจจุบัน จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ปัจจัยของขนาดคละหินมี 3 ระดับ ได้แก่ 1 นิ้ว 3/4 นิ้ว และ 3/8 นิ้ว

2) ปัจจัยของขนาดคละทรายมี 3 ระดับ ได้แก่ ทรายหยาบ ทรายกึ่งกลาง และทรายละเอียด

3) ปัจจัยของสัดส่วนผสมระหว่างหินและทราย หรือที่นิยมเรียกทั่วไปว่าสัดส่วนมวลรวมนั้นทางทีมวิศวกรออกแบบคอนกรีตของทางโรงงานมีข้อสรุปว่าให้กำหนดสัดส่วนออกเป็น 3 รูปแบบคือ รูปแบบที่ 1 ใช้หิน 46 เปอร์เซ็นต์ ต่อทราย 54 เปอร์เซ็นต์ รูปแบบที่ 2 ใช้หิน 42 เปอร์เซ็นต์ ต่อทราย 58 เปอร์เซ็นต์ และรูปแบบที่ 3 ใช้หิน 38 เปอร์เซ็นต์ ต่อทราย 62 เปอร์เซ็นต์ ยกตัวอย่างเช่น รูปแบบที่ 1 สมมติให้มวลรวมทั้งหมด ในการผสมคอนกรีตเท่ากับ 100 กิโลกรัม จะแบ่งเป็นหินเท่ากับ 46 กิโลกรัม และแบ่งเป็นทรายเท่ากับ 54 กิโลกรัม เป็นต้น

4) ปัจจัยระยะของเวลาการบ่มมี 2 ระดับ คือที่ 7 วัน และ 28 วัน ซึ่งเป็นมาตรฐานการตรวจสอบคอนกรีตที่ยอมรับกันทั่วไป

ตารางที่ 1 แสดงปัจจัยและระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)	รหัส
ขนาดหิน (Rock Size, R)	1 นิ้ว	1
	3/4 นิ้ว	0
	3/8 นิ้ว	-1
ขนาดทราย (Sand Size, S)	หยาบ	1
	กึ่งกลาง	0
	ละเอียด	-1
ส่วนผสมของหินและทราย (Sand to Aggregate, SA)	รูปแบบที่ 1 หิน 46% ต่อทราย 54%	1
	รูปแบบที่ 2 หิน 42% ต่อทราย 58%	0
	รูปแบบที่ 3 หิน 38% ต่อทราย 62%	-1
ระยะเวลาการบ่ม (Ripeness, Ri)	28 วัน	1
	7 วัน	-1

หมายเหตุ: ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำเท่าเดิม

3.2 ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามในการงานวิจัยนี้ คือการรับแรงอัดคอนกรีตในแต่ละการทดลอง งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่อศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยต่างๆ พร้อมกัน การจัดลำดับการทดลองครั้งนี้เป็นการจัดลำดับการทดลองแบบสุ่ม รวมถึงจะทดลองซ้ำ 6 ครั้งรวมเป็นการทดลองทั้งสิ้น 354 การทดลอง ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบกำลังอัดคอนกรีตนั้นมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. ซึ่งมีหน่วยการวัดคือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4. ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

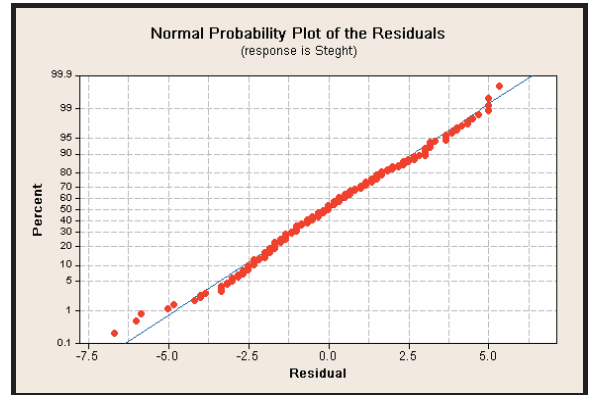
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

Montgomery [6] ได้กล่าวไว้ว่า ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล ควรจะตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลักดังต่อไปนี้

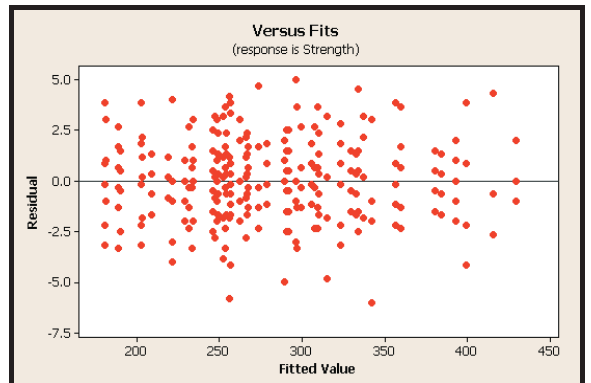
1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distributed) ของส่วนตกค้าง (Residual) จากรูปที่ 1 พบว่าค่า Residual มีการกระจายตามแนวเส้นตรงจึงประมาณได้ว่าค่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติ

2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (σ^2) รูปที่ 2 แสดงแผนภูมิการกระจายของค่า Residual เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง (Fitted Value) จากรูปที่ 2 จะพบว่าค่า Residual มีค่าความแปรปรวนเสถียรอยู่ในระดับที่น่าพอใจและไม่พบว่าการทดลองมีสิ่งผิดปกติ

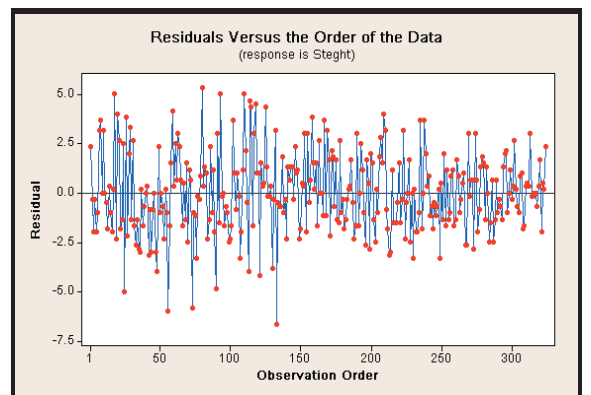
3) จากการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างในรูปที่ 3 ผู้วิจัยพบว่าการกระจายตัวของ Residual ไม่เป็นแนวโน้มจึงอนุมานได้ว่าการทดลองเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 1 การกระจายตัวแบบปกติ ของค่า Residual



รูปที่ 2 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Fitted Value



รูปที่ 3 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Observation Order

จากการตรวจสอบรูปที่ 1 ถึง 3 ผู้วิจัยพบว่ารูปแบบของค่า Residual ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองทุกประการ และเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

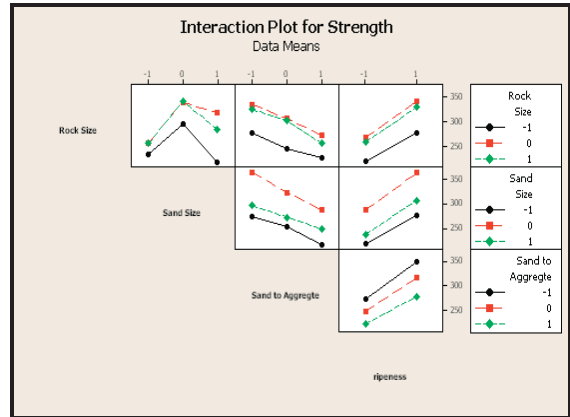
4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ทำการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ผลจากการวิเคราะห์ที่ผู้วิจัยได้แสดงในตารางที่ 2 นั้นเป็นการเปรียบเทียบค่า P-Value กับค่านัยสำคัญของการทดลอง โดยที่ค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ จึงจะถือว่าปัจจัยที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นมีผลต่อกำลังอัดคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าค่า P-Value ของขนาดคละหิน ทรายอัตราส่วนผสมระหว่างหินและทราย และระยะเวลาการบ่มนั้นมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าทุกปัจจัยล้วนส่งผลกระทบท่อความสามารถในการรับแรงอัดคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป พบว่าผลกระทบร่วมนั้นมีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

ปัจจัย	P-value	ค่าสัมประสิทธิ์
Constant	0.000	282.836
Rock size (R)	0.000	22.699
Sand size (S)	0.000	12.370
Sand to aggregate (SA)	0.000	-30.264
Ripeness (Ri)	0.000	33.904
R * S	0.000	11.417
R * SA	0.000	-5.035
R * Ri	0.000	3.412
S * SA	0.000	2.403
S * Ri	0.000	2.657
SA * Ri	0.000	-4.699
R * S * SA	0.000	-3.240
R * S * Ri	0.000	0.597
R * SA * Ri	0.000	0.396
S * SA * Ri	0.000	-2.042
R * S * SA * Ri	0.000	-0.406

S = 2.15 R-sq = 99.90% R-sq(adj.) = 99.88%



รูปที่ 4 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมแต่ละคู่ของปัจจัย

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างขนาดหินกับขนาดทราย ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ถ้าใช้หินขนาด 3/8 นิ้ว ผสมกับทรายแบบละเอียดหรือแบบหยาบ จะให้การรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำกว่าที่กำหนด และควรเลือกใช้หินขนาด 3/4 และ 1 นิ้ว ผสมกับทรายทุกแบบจะให้การรับแรงดีกว่าการใช้หินขนาด 3/8 ผสมกับทรายแบบเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างขนาดของหินกับสัดส่วนผสมมวลรวมจะมีผลเหมือนกันกับผลกระทบร่วมระหว่างหินและทราย

เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างทรายกับสัดส่วนผสมระหว่างหินและทราย ผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถใช้ทรายแบบหยาบและแบบกึ่งกลางกับทุกสัดส่วนผสมระหว่างหินและทรายเพราะจะให้การรับแรงดีกว่าการใช้ทรายแบบละเอียดกับสัดส่วนผสมระหว่างหินและทรายแบบเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาในการบ่มกับขนาดของหิน ทราย และสัดส่วนผสมระหว่างหินกับทราย พบว่า ทุกขนาดของ หิน ทราย และทุกสัดส่วนผสมระหว่างหินและทราย ควรใช้ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ถ้าต้องการรับแรงอัดสูงที่สุด

จากตารางที่ 2 สามารถเขียนสมการการทำนาย (Regression) ของค่าการรับแรงอัดคอนกรีต (Y) ในรูปของปัจจัยต่างๆ ดังสมการที่ 1 จากนั้นจะนำสมการนี้ไปหาค่าที่เหมาะสมในหัวข้อถัดไป

$$Y = 283.83 + 22.69(R) + 12.37(S) - 30.26(SA) + 33.9(Ri) + 11.42(R*S) - 5.04(R*SA) + 3.41(R*Ri) + 2.40(S*SA) + 2.66(S*Ri) - 4.70(SA*Ri) - 3.24(R*S*SA) + 0.60(R*S*Ri) + 0.40(R*SA*Ri) - 2.04(S*SA*Ri) - 0.41(R*S*SA*Ri) \quad (1)$$

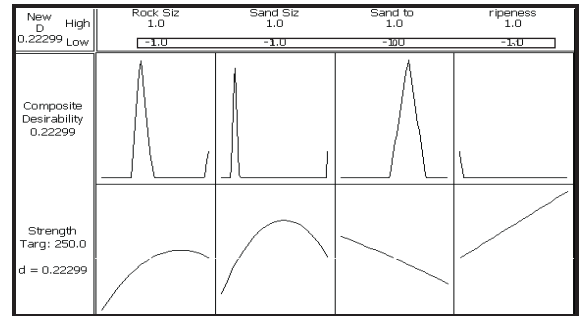
5. หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4 พบว่าค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตจากส่วนผสมแบบต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 230 ถึง 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร งานวิจัยนี้ต้องการหาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการผสมคอนกรีตที่สามารถรับแรงได้ในช่วง 240 ถึง 260 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากเป็นค่ามาตรฐานในการผลิตคอนกรีตสำหรับงานทั่วไป และทางโรงงานการศึกษาที่มีการผลิตสำหรับงานประเภทนี้มากที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการหาระดับของปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตขนาดดังกล่าวเท่านั้น ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 5

หลักการที่ใช้ในการคำนวณค่าที่เหมาะสมที่แสดงในรูปที่ 5 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คำนวณโดยใช้ค่าการรับแรงที่ 240 และ 260 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นขอบเขตล่าง (Lower) และขอบเขตบน (Upper) ตามลำดับ
2. ตั้งค่าที่ต้องการ (Target) ไว้ที่ 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากต้องการเพื่อความคลาดเคลื่อนของตัวเลขจากการทดลอง ซึ่งในกรณีนี้สามารถรองรับความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ถึง $\pm 10 \text{ Kg/cm}^2$

จากผลลัพธ์ที่แสดงในรูปที่ 5 นั้นตรงกรอบสี่เหลี่ยมเป็นค่าที่เหมาะสมในการเลือกระดับของปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ผลิตคอนกรีตให้รับแรงอัดได้ระหว่าง 240 ถึง 260 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยต้องใช้หินขนาด 1 นิ้ว (รหัส 1) ใช้ทรายแบบหยาบ (รหัส 1) สัดส่วนระหว่างน้ำหนักหินและทรายเป็นรูปแบบที่ 2 (รหัส 0) นั่นคือใช้หิน 42% ต่อทราย 58% และบ่มที่ระยะเวลา 7 วัน (รหัส -1) โดยสามารถใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำเท่าเดิมได้ (ตัวเลข -1, 0, 1 ในกรอบสี่เหลี่ยมนั้นเป็นรหัส



รูปที่ 5 ค่าที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตที่รับแรงอัดระหว่าง 240-260 Kg/cm²

ที่แทนระดับของปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แสดงไว้แล้วในตารางที่ 1)

6. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาด สัดส่วนมวลรวม และระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสม เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการลดหรือยกเลิกการเผื่อปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยแบ่งปัจจัยออกเป็น 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ขนาดหิน ขนาดทราย และสัดส่วนผสมระหว่างหินและทราย รวมถึงระยะเวลาการบ่มคอนกรีต โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟกทอเรียล (Full Factorial Design) ผลการทดลองพบว่าปัจจัยทั้ง 4 ล้วนส่งผลต่อการรับกำลังอัดคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และสามารถหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละปัจจัยได้ดังนี้ (1) ขนาดหินที่ 1 นิ้ว (2) ขนาดทรายแบบหยาบ (3) สัดส่วนผสมระหว่างหินและทรายควรเลือกรูปแบบที่ 2 และ (4) ใช้ระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมคือ 7 วัน จากส่วนผสมนี้ทำให้โรงงานสามารถผลิตคอนกรีตที่สามารถรับกำลังอัดในช่วง 240 ถึง 260 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ได้โดยไม่ต้องมีการเผื่อปูนซีเมนต์ให้มากขึ้นอีกต่อไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากการผลิตคอนกรีตไม่สามารถนำคอนกรีตที่แห้งแล้วกลับมาปรับปรุงได้ ทางโรงงานจึงได้ตัดสินใจใช้ส่วนผสมจากการทดลองร่วมกับการเผื่อปูนซีเมนต์เหมือนเดิม แต่จะเผื่อในปริมาณน้อยลง ซึ่งในช่วงแรกจะเผื่อ

น้อยลงกว่าเดิม 50 เปอร์เซ็นต์ และจะทำการทดลองเพื่อ
น้อยลงเรื่อยๆ ถ้าส่วนผสมดังกล่าวยังสามารถใช้งานได้ดี

7. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาขั้นต้นในการเลือก
หาขนาดของหินและทราย สัดส่วนผสมรวม รวมถึง
ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต ที่เหมาะสมกับการผลิต
คอนกรีตที่แรงอัด 240 ถึง 260 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์
เซนติเมตรเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงคิดว่าควรมีการนำผล
การทดลองนี้ไปใช้กับการผลิตคอนกรีตที่มีการรับแรง
อัดขนาดอื่นๆ เพื่อที่จะสามารถลดต้นทุนการเผื่อ
ปูนซีเมนต์ให้น้อยลงหรือหมดไปและยังควรมีการศึกษา
ถึงปัจจัยอื่นๆ ที่น่าจะมีผลกระทบต่อการรับแรงอัด
ของคอนกรีต เช่น อัตราส่วนผสมน้ำรวมถึงน้ำยาทาง
เคมีที่ใช้ในการผสมคอนกรีต เป็นต้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลงได้ ด้วยการสนับสนุน
จากโรงงานการศึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำช่วยเหลือใน
ด้านการเก็บข้อมูล รวมทั้งที่วิศวกรทุกๆ ท่าน ที่คอย
ช่วยเหลือในการให้คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับคอนกรีตผสม
เสร็จ และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
พระจอมเกล้าพระนครเหนือที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย
ฉบับนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.M. Neville and J.J. Brooks, *Concrete Technology*, Singapore Longman Singapore Publishers (Pte) Lid, 1996.
- [2] K.A. Soudki, E.F.El Salakawy, and NB. Elkum, "Full Factorial Design Optimization of Concrete Mix Design for Hot Climates," *ASCE Journal of Materials in Civil*, vol. 13, pp. 78-86, 2001.
- [3] M.J. Simon, "Concrete Mixture Optimization using Statistical Methods," *Infrastructure Research and Development*, pp. 14-24, 2003.
- [4] A. Ahmad, "Optimum Concrete Mixture Design using Locally available Ingredients," *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 32, Number 1B, pp. 57-59, 2006.
- [5] C. Saikaew, "Statistically designed experiment for process improvement a case study in concrete fence manufacturing," *Proceedings of the 37th International Conference on Computer and Industrial Engineering*, 2007, pp. 108-116.
- [6] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5th edition, The United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2001.