การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางสถิติ เพื่อหาส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ

สนธยา ทองอรุณศรี* และ อัศวิน คุณาแจ่มจรัส

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลองในงานวิศวกรรมโยธา เนื่องจากการใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลองจะทำให้จำนวนตัวอย่างลดลง ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีที่ใช้ทั่วไป งานวิจัยนี้เลือกใช้การหาส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกที่สามารถผลิตคอนกรีตบล็อกให้มีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐาน มอก. 58-2533 และมีต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นเป้าหมายในการศึกษา เนื่องจากในแต่ละปีมีความต้องการใช้คอนกรีตบล็อกเป็นจำนวนมากทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ แต่เนื่องจากไม่มีการออกแบบส่วนผสมที่เป็นมาตรฐาน คอนกรีตบล็อกส่วนใหญ่ที่มีขายอยู่ในปัจจุบันจึงมีคุณภาพไม่ได้ตามมาตรฐาน จากผลการวิจัยพบว่าการใช้การออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียล ร่วมกับการออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง มีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบการทดลองสำหรับคอนกรีตบล็อก แบบจำลองที่ได้สามารถทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกได้ดี จากผลการวิจัยพบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมมีทั้งสิ้น 4 ส่วนผสม ความเหมาะสมของแต่ละส่วนผสมขึ้นอยู่กับวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต โดยส่วนผสมที่ใช้หินเกล็ด อัตราส่วนโดยปริมาตรที่แนะนำคือ 1 : 3 : 8 : 4 (ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ : หินฝุ่น : หินเกล็ด) เมื่อผลิตด้วยเครื่องแบบเท้าเหยียบ และ 1 : 3 : 10 : 5 เมื่อผลิตด้วยเครื่องแบบไฮดรอลิค สำหรับส่วนผสมที่ไม่ใช้หินเกล็ด คือ 1 : 2 : 10 (ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ : หินฝุ่น) เมื่อผลิตด้วยเครื่องแบบเท้าเหยียบ และ 1 : 3 : 13 เมื่อผลิตด้วยเครื่องแบบไฮดรอลิค ส่วนผสมทั้ง 4 มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าส่วนผสมส่วนใหญ่ที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งแสดงว่าการผลิตคอนกรีตบล็อกให้ได้มาตรฐาน ไม่จำเป็นต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูงกว่าส่วนผสมทั่วไป

คำสำคัญ : คอนกรีตบล็อก, กำลังอัด, แบบจำลอง, ส่วนผสม, มอก. 58-2533
(การประชุมวิชาการการวิจัยภาคปฏิบัติและการพัฒนา ครั้งที่ 1 เชียงใหม่)

สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: Sontaya@rmutl.ac.th รับเมื่อ 1 สิงหาคม 2554 ตอบรับเมื่อ 10 ตุลาคม 2554

Applications of Statistical Model in Proportioning of Concrete Block to Minimum Cost

Sontaya Tongaroonsri* and Asawin Kunajamjarus

Abstract

The purpose of this study is to apply the statistical design of experiment in the field of civil engineering. The advantages of using statistical experimental design are the reduction of the number of samples, shorten the experimental period and save cost of the experiment. The results obtained from statistical analysis have more reliable than the traditional method. This study used the statistical experimental design to find the mix proportion of concrete block that conform the TIS 58-2533 standard at the lowest possible production cost as the case study of the research. In each year, demand of concrete block is increasing throughout the country. Since there are no standard mix proportion for concrete block, commonly sold concrete blocks in the market do not possess properties as required in the standard. Statistical methodology is applied to predict compressive strength and calculated optimum mix proportions for concrete block. From test results, it was shown that the using of factorial design and central composite design were suitable for the optimization of concrete block. The simulated model can be satisfactorily used to predict compressive strength of concrete block in the test program. Four optimum mix proportions have been found. For concrete block which uses Chipped stone as raw material, suggested mix proportion was 1 : 3 : 8 : 4 [cement : coarse sand : crushed dust : Chipped stone] by weight for machine production (non-hydraulic type) and 1 : 3 : 10 : 5 [cement : coarse sand : crushed dust : Chipped stone] by weight for machine production (hydraulic type). For concrete block which does not use Chipped stone as raw material, suggested mix proportion was 1 : 2 : 10 [cement : coarse sand : crushed dust] by weight for machine production (non-hydraulic type) and 1 : 3 : 13 [cement : coarse sand : crushed dust] by weight for machine production (hydraulic type). All suggested mix proportions require less production cost than normally used mix proportions in the market. It can be concluded that the production cost does not necessarily increase in order to produce a standard concrete block.

Keywords: Concrete block, Compressive strength, Model, Mix proportion, TIS 58-2533

(Selected from 1st Symposium on Hands-on Research and Development, Chiang Mai)

Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak

* Corresponding author, E-mail: Sontaya@rmutl.ac.th Received 1 August 2011; Accepted 10 October 2011

1. บทนำ

คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุก่อที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่สะดวกในการก่อสร้าง มีราคาถูก มีความแข็งแรง และคงทนต่อสภาพอากาศ มีความสามารถทนไฟได้สูง ระบายความร้อนได้ดี มีค่าการยืดหดตัวซึ่งเกิดจากความชื้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำ [1-3] ในแต่ละปีมีความต้องการใช้เป็นจำนวนมากทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ แต่เนื่องจากไม่มีการออกแบบส่วนผสมให้เป็นมาตรฐาน ผู้ผลิตแต่ละรายจึงใช้อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน ส่วนผสมที่ใช้มักคำนึงถึงเฉพาะต้นทุนในการผลิตเป็นสำคัญ โดยไม่ได้คำนึงถึงคุณสมบัติด้านวิศวกรรม ทำให้คอนกรีตบล็อกที่มีขายอยู่ในปัจจุบันมีคุณภาพต่ำ ผู้ประกอบการผลิตคอนกรีตบล็อกสามารถแบ่งได้เป็น สองกลุ่มคือ ผู้ประกอบการรายใหญ่ที่ผลิตคอนกรีตบล็อก โดยใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ ใช้การอัดขึ้นรูปโดยระบบไฮดรอลิค ซึ่งสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก กลุ่มที่สองคือ ผู้ผลิตรายย่อย ส่วนใหญ่เป็นชาวบ้านในท้องถิ่นที่ทำเป็นอุตสาหกรรมครัวเรือน โดยใช้เครื่องจักรกึ่งอัตโนมัติแบบเท้าเหยียบ หากมีส่วนผสมที่ไม่ดีคอนกรีตบล็อกที่ได้ จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าการใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ ทำให้เกิดปัญหาการเสียหายของคอนกรีตบล็อกทั้งขณะขนย้ายและก่อสร้าง หากผู้ผลิตรายย่อยต้องการเพิ่มคุณภาพให้เท่าเทียมกับ การผลิตด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติ ต้องเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น จนไม่สามารถแข่งขันทางการตลาดกับผู้ประกอบการรายใหญ่ได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงดำเนินการศึกษากระบวนการผลิตคอนกรีตบล็อก เพื่อหาแนวทางในการพัฒนาส่วนผสม สำหรับผลิตคอนกรีตบล็อกให้มีต้นทุนต่ำ และมีคุณภาพตามมาตรฐาน มอก.58-2533 [4] ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาส่วนผสม ที่ใช้สำหรับเครื่องจักรแบบเท้าเหยียบและสำหรับเครื่องจักรระบบไฮดรอลิค การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้ใช้หลักการทางสถิติ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและการทดลองทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ เพราะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลองและให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย [5] แต่สำหรับการทดลองในงานด้านวิศวกรรมโยธาในประเทศไทย ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางสถิติขั้นสูงและมีความซับซ้อน อย่างไรก็ตามพบว่างานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ในงานวิศวกรรมโยธาในต่างประเทศมีการใช้หลักการทางสถิติในการหาจุดที่ให้ผลดีที่สุด (optimum) [6-8] อย่างแพร่หลาย

2. ระเบียบวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้หลักการทางวิศวกรรมศาสตร์ และการวิเคราะห์โดยใช้หลักทางสถิติ เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายกำลังอัด และหาส่วนผสมที่ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ข้อดีของการใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลองคือ ลดจำนวนตัวอย่างที่ต้องทดลองลง ดังตารางที่ 1 ซึ่งเปรียบเทียบจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติและวิธีทั่วไป ซึ่งพบว่าการออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติมีจำนวนตัวอย่างน้อยกว่ามาก จึงสามารถลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองลงได้ ผลที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีที่ใช้ทั่วไป นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทดลองและสามารถวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดได้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

Experimental design method	Number of Mix	Number of samples
General method	>50	>2500
Statistical method	20	1000

Note : 50 samples/mix

2.1 การออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ

การวางแผนการทดลองเชิงสถิติ (statistical design of experiment) หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้การออกแบบการทดสอบโดยใช้หลักสถิติ มีหลายวิธี เช่น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (factorial design) การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (fractional factorial design) และการออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง (central composite design, CCD) เป็นต้น งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลอง 2 แบบ คือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล และการออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง โดยการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล มีสมมติฐานว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีลักษณะเป็นเส้นตรง ส่วนการออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองในกรณีที่ตรวจสอบแล้วว่า ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะของส่วนโค้งมาเกี่ยวข้องหรือความสัมพันธ์ที่เหมาะสมไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเส้นตรง [9] รายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง และสถิติที่ใช้วิเคราะห์สามารถศึกษาได้จาก Box(1978) [10] และ Ghosh(1990) [11]

จากการสำรวจข้อมูลของโรงงานผลิตคอนกรีตบล็อกในจังหวัดตาก พบว่าส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกคือ ปูนซีเมนต์ ทราย และหินฝุ่น ในบางแห่งมีการใช้หินเกล็ดเป็นส่วนผสมด้วย แต่ละโรงงานใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกันอย่างมาก โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้มีค่าอยู่ระหว่าง 3.9 ถึง 13.7 % โดยน้ำหนัก จากข้อมูลเบื้องต้นจึงกำหนดตัวแปรและค่าที่ใช้ในการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 2 สำหรับคอนกรีตบล็อกที่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสม และตารางที่ 3 สำหรับคอนกรีตบล็อกที่ไม่มีหินเกล็ด การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในการออกแบบตัวแปร (coded variable) ดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับงานคอนกรีต[5] เมื่อนำช่วงของตัวแปรในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์ในการออกแบบตัวแปรในตารางที่ 4 มาคำนวณเป็นส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองได้ทั้งสิ้น 20 และ 9 ชุดทดสอบ ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ตัวแปรและช่วงของตัวแปรที่ใช้ออกแบบการทดลองสำหรับส่วนผสมที่มีหินเกล็ด

Variable	Range of variable
X_1= Cement content (% by weight)	2.0 - 8.0
X_2 = Sand to aggregate ratio (S/M)	0.2 - 1.0
X_3 = Crush dust to chipped stone ratio (F/R)	1.0 – 2.0

ตารางที่ 3 ตัวแปรและช่วงของตัวแปรที่ใช้ออกแบบการทดลองสำหรับส่วนผสมที่ไม่มีหินเกล็ด

Variable	Range of variable
X_1= Cement content (% by weight)	3.0 - 10.0
X_2 = Sand to crush dust ratio (S/F)	0.2 - 1.0

2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ

หลังจากออกแบบการทดลอง เตรียมตัวอย่างและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกแล้ว การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1) วิเคราะห์การแจกแจงของกำลังอัดในแต่ละชุดการทดสอบว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยใช้สถิติ Shapiro-Wik Test ในการตรวจสอบ หากพบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ ต้องทำการเก็บข้อมูลเพิ่มเติม หรือทำการแปลงข้อมูล

2) วิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวกับค่ากำลังอัด เพื่อพิจารณาว่าตัวแปรใดบ้างที่ควรนำมาใช้สร้างแบบจำลอง

3) วิเคราะห์ผลของส่วนโค้ง (curvature) จากผลการทดลองที่ออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เพื่อตรวจสอบว่าควรสร้างแบบจำลองที่มีกำลังสองหรือไม่ หากพบว่าสมการกำลังหนึ่งไม่เพียงพอ ให้วิเคราะห์และสร้างแบบจำลองจากข้อมูลที่ได้จากการออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง แล้วตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองจากสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination, R^2) ค่า R^2 แสดงให้ทราบว่า

ความแปรผันที่เกิดขึ้นใน กำลังอัด เป็นผลเนื่องมาจาก ตัวแปรร้อยละเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมากแสดงว่า มีความสัมพันธ์กันมาก อย่างไรก็ตาม การที่ค่า R^2 มีค่ามากไม่ได้แปลว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานี้ดีเสมอไป เนื่องจากว่าการเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้น แม้ว่าตัวแปรที่เติมเข้าไปนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ก็ตาม ดังนั้นจึงมีการใช้ค่า R^2 ปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) มาใช้เปรียบเทียบแทน เนื่องจากตามปกติแล้ว R^2_{adj} จะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรในแบบจำลอง แต่ในทางกลับกัน หากเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงในแบบจำลอง ค่าของ R^2_{adj} จะลดลงเสมอ

4) วิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมหรือไม่ โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (residual) จากกราฟระหว่าง ส่วนตกค้างและค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง หากแบบจำลองถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้ว ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ ทั้งสิ้น หรืออาจพิจารณาจากกราฟระหว่าง Normal Probability และส่วนตกค้าง หากพบว่ามีการแจกแจงแบบปกติ แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสม

5) เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้ว จะคำนวณหาจุดเหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกจุดที่มีการใช้ปูนซีเมนต์น้อยที่สุด ที่ได้คอนกรีตบล็อกมีคุณสมบัติผ่านมาตรฐาน มอก.58-2533 เป็นจุดที่เหมาะสม โดยการสร้างกราฟแนวโน้มและพื้นผิวผลตอบ เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดเนื่องจากตัวแปรต่างๆ (profiles for predicted values)

2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.13

2) ทรายหยาบ มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.14 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ร้อยละการดูดกลืนน้ำเท่ากับ 0.16 และมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,636 กก./ลบ.ม.

3) หินฝุ่น ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีส่วนผสมของหินขนาดเล็กที่ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว บางส่วน โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.48 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.75 และมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,906 กก/ลบ.ม.

4) หินเกล็ด มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 5.79 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 ร้อยละการดูดกลืนน้ำเท่ากับ 0.33 และมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,613 กก/ลบ.ม.

ตารางที่ 4 แสดงค่า coded variable และค่าที่แปลงเป็นอัตราส่วนจริง

Mix	Value of the coded variable			Variable		
	X_1	X_2	X_3	C	S/M	F/R
1	0.58	0.58	0.58	6.7	0.83	1.79
2	0.58	0.58	-0.58	6.7	0.83	1.21
3	0.58	-0.58	0.58	6.7	0.37	1.79
4	-0.58	0.58	0.58	3.3	0.83	1.79
5	0.58	-0.58	-0.58	6.7	0.37	1.21
6	-0.58	0.58	-0.58	3.3	0.83	1.21
7	-0.58	-0.58	0.58	3.3	0.37	1.79
8	-0.58	-0.58	-0.58	3.3	0.37	1.21
9	0.97	0	0	7.9	0.60	1.50
10	-0.97	0	0	2.1	0.60	1.50
11	0	0.97	0	5.0	0.99	1.50
12	0	-0.97	0	5.0	0.21	1.50
13	0	0	0.97	5.0	0.60	1.99
14	0	0	-0.97	5.0	0.60	1.02
15	0	0	0	5.0	0.60	1.50
16	0	0	0	5.0	0.60	1.50
17	0	0	0	5.0	0.60	1.50
18	0	0	0	5.0	0.60	1.50
19	0	0	0	5.0	0.60	1.50
20	0	0	0	5.0	0.60	1.50

Note: X_1, X_2 and X_3 are variable number 1, 2 and 3, respectively

2.4 การเตรียมตัวอย่างและทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อก

ผลิตคอนกรีตบล็อกตามส่วนผสมที่คำนวณจากช่วงตัวแปรในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ด้วยเครื่องแบบเท้าเหยียบและใช้เครื่องผสมคอนกรีตชนิดราบ ดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ในแต่ละชุดทดสอบผลิตชุดละ 50 ตัวอย่าง แล้วบ่มโดยการผึ่งในลานโล่ง ดังรูปที่ 3 แล้วนำคอนกรีตบล็อกไปทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน จำนวน 36 ตัวอย่าง ด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด และทดสอบการดูดกลืนน้ำ จำนวน 5 ตัวอย่าง มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคอนกรีตบล็อกได้แก่ มอก.109-2517 (วิธีชักตัวอย่างและการทดสอบวัสดุงานก่อซึ่งทำด้วยคอนกรีต) [12] จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดมีจำนวนมาก เพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะการแจกแจงของกำลังอัดสำหรับตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการทดสอบ ว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้หรือไม่ ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้านสถิติอื่นๆ ต่อไป

รูปที่ 1 เครื่องอัดคอนกรีตชนิดเท้าเหยียบ

รูปที่ 2 เครื่องผสมคอนกรีตชนิดราบ

รูปที่ 3 การบ่มคอนกรีตบล็อกในลานโล่ง

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

จากการทดสอบกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วันได้ผลดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น กำลังอัดก็จะเพิ่มขึ้น และคอนกรีตบล็อกที่มีหน่วยน้ำหนักมาก กำลังอัดมีค่ามากเช่นกัน เนื่องจากเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจนได้ผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานให้ส่วนผสมต่างๆ ยึดติดกัน ดังนั้นหากในส่วนผสมมีปูนซีเมนต์มากก็จะทำให้เกิด CSH ได้มาก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกสูงตามไปด้วย จากผลการทดสอบในตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 หากเป็นการทดสอบโดยใช้วิธีการทั่วไป อาจสรุปว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ 6.5% ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐาน แต่เมื่อวิเคราะห์โดยใช้หลักทางสถิติค่าที่ได้จะแตกต่างกัน และมีความน่าเชื่อถือมากกว่า เนื่องจากสามารถตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้ งานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองทำนายกำลังอัดแล้วจึงนำแบบจำลองที่ได้ ไปวิเคราะห์หาส่วนผสมที่เหมาะสม

3.1 แบบจำลองทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบล็อก

ค่ากำลังอัดที่แสดงในตารางที่ 5 เป็นค่าเฉลี่ยจากข้อมูลทั้งหมด 36 ตัวอย่างต่อหนึ่งชุดทดสอบ การนำค่าเหล่านี้ไปใช้วิเคราะห์ในขั้นสูงต่อไปนั้น มีสมมติฐานว่า ข้อมูลที่ใช้ต้องมีการแจกแจงแบบปกติ [5] ดังนั้นจึงวิเคราะห์ลักษณะการแจกแจงโดยใช้สถิติ Shapiro-Wilk Test ผลการวิเคราะห์สรุปว่า

ทุกชุดทดสอบมีแจกแจงข้อมูลแบบปกติ ดังนั้นจึงสามารถไปสร้างแบบจำลองในขั้นต่อไปได้ จากตารางที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าไม่มีการใช้หน่วยน้ำหนักในการออกแบบการทดลองตั้งแต่ต้น เนื่องจากการผลิตคอนกรีตบล็อกโดยใช้เครื่องแบบเท้าเหยียบ มีความแปรปรวนสูง ควบคุมความสม่ำเสมอของหน่วยน้ำหนักได้ยาก แต่ในกรณีที่ผลิตด้วยกระบวนการผลิตที่สามารถควบคุมหน่วยน้ำหนัก ก็สามารถนำหน่วยน้ำหนักมาเป็นตัวแปรได้

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ตามขั้นตอนดังแสดงในหัวข้อที่ 2.2 พบว่าการสร้างแบบจำลองโดยใช้สมการเส้นตรงจากการวิเคราะห์เชิงแฟกทอเรียลไม่เพียงพอ จำเป็นต้องใช้สมการกำลังสอง จากการวิเคราะห์ด้วยการออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลางร่วมด้วย และสามารถสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกแบ่งเป็น 4 แบบจำลอง แยกตามความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน รายละเอียดไม่ได้แสดงในบทความนี้เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมากแต่สามารถสืบค้นได้จาก สนธยา (2548) [13] แบบจำลองที่ (1)–(4) มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด เท่ากับ 0.96, 0.98, 0.96 และ 0.98 ตามลำดับ แบบจำลองแสดงดังสมการที่ (1)–(4) ในกรณีของส่วนผสมที่มีหินเกล็ดพบว่า อัตราส่วนระหว่างหินฝุ่นต่อหินเกล็ดมีผลน้อยมากต่อกำลังอัด ดังนั้นจึงไม่นำตัวแปรนี้มาใช้สร้างแบบจำลอง

แบบจำลองที่ 1 (สำหรับคอนกรีตบล็อกที่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสม และไม่ทราบหน่วยน้ำหนัก)

$$Y = -19.198 + 8.684\,X_1 + 4.422\,X_2 - 2.093\,X_1X_2 \qquad (1)$$

แบบจำลองที่ 2 (สำหรับคอนกรีตบล็อกที่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสมและทราบหน่วยน้ำหนัก)

$$Y = -144.141 - 22.034X_1 + 157.555X_2 + 28.439X_2^2 + 0.0754W + 0.0121X_1W - 0.0947X_2W \qquad (2)$$

แบบจำลองที่ 3 (สำหรับคอนกรีตบล็อกที่ไม่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสมและไม่ทราบหน่วยน้ำหนัก)

$$Y = -0.461 + 6.270\,X_1 - 8.921\,X_3 \qquad (3)$$

แบบจำลองที่ 4 (สำหรับคอนกรีตบล็อกที่ไม่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสมและทราบหน่วยน้ำหนัก)

$$Y = -224.837 + 3.570X_1 - 61.156X_3 + 42.662X_3^2 + 0.1212W \qquad (4)$$

โดย Y คือ กำลังอัดของคอนกรีตบล็อก (กก./ตร.ซม.)

X_1 คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

X_2 คือ อัตราส่วนทรายต่อมวลรวมหยาบ (S/M) โดยมวลรวมหยาบ คือ หินฝุ่นและหินเกล็ด

X_3 คือ อัตราส่วนทรายต่อหินฝุ่น (S/F)

W คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตบล็อก (กก./ลบ.ม.)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกที่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสม ที่อายุ 28 วัน

Mix	Cement content (%)	Unit weight (kg/m^3)	Compressive strength (kg/cm^2)	Absorption (%)
1	6.7	2,189	33.39	7.75
2	6.7	2,225	31.28	6.86
3	6.7	2,180	36.75	7.09
4	3.3	2,005	8.07	11.26
5	6.7	2,192	38.00	6.65
6	3.3	2,083	8.28	10.57
7	3.3	2,026	8.38	9.91
8	3.3	2,065	10.20	9.04
9	7.9	2,210	37.21	7.12
10	2.1	2,038	5.38	9.71
11	5.0	2,071	16.61	9.18
12	5.0	2,086	22.34	8.26
13	5.0	2,085	17.50	9.02
14	5.0	2,182	25.05	8.06
15	5.0	2,101	15.85	8.91
16	5.0	2,140	21.06	8.81
17	5.0	2,136	18.88	8.97
18	5.0	2,168	23.06	8.58
19	5.0	2,144	17.94	8.82
20	5.0	2,124	18.25	8.23

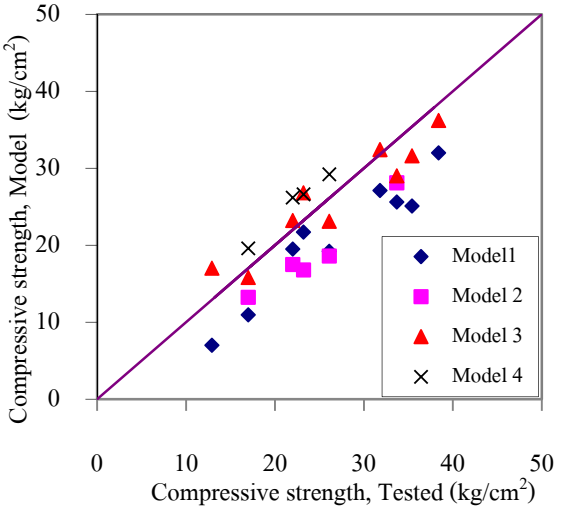
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกที่ไม่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสม ที่อายุ 28 วัน

Mix	Cement content (%)	Unit weight (kg/m^3)	Compressive strength (kg/cm^2)	Absorption (%)
1	8.5	2,114	44.76	8.30
2	8.5	2,125	52.45	7.99
3	4.5	2,056	22.86	9.63
4	4.5	1,982	23.44	11.25
5	9.9	2,110	51.83	8.68
6	3.1	1,962	7.52	12.79
7	6.5	2,004	29.22	10.06
8	6.5	1,930	23.67	10.88
9	6.5	2,066	31.21	9.34

3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในสมการที่ (1) – (4) จึงเปรียบเทียบกำลังอัดที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่สุ่มเก็บตัวอย่างจากร้านค้าในจังหวัดตาก แสดงผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่าค่าจากแบบจำลองที่ 3 ซึ่งคำนวณจากปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนทรายต่อหินฝุ่น ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากมากที่สุด ในขณะที่แบบจำลองที่ 4 ซึ่งคำนวณจากปริมาณวัสดุและหน่วยน้ำหนักให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบเล็กน้อย ส่วนแบบจำลองที่ 1 และ 2 ให้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ แต่ก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากผลทดสอบที่ใช้ เป็นผลจากการทดสอบคอนกรีตบล็อกที่ไม่มีหินเกล็ด ในขณะที่แบบจำลองที่ 1 และ 2 ใช้สำหรับคอนกรีตบล็อกที่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสม อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้ง 4 สามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ สามารถนำแบบจำลองเหล่านี้ไปใช้งานได้



รูปที่ 4 เปรียบเทียบกำลังอัดจากแบบจำลองกับผลการทดลอง

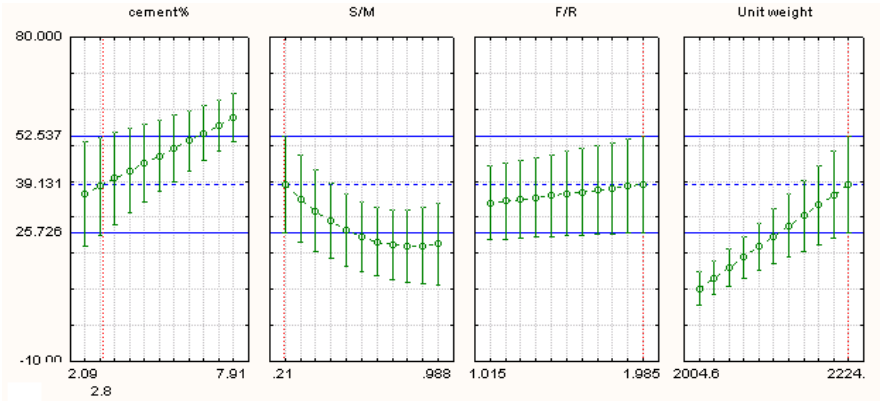
4. การหาส่วนผสมที่มีต้นทุนต่ำ

เมื่อต้องการให้ต้นทุนการผลิตต่ำ ส่วนผสมที่ใช้ ต้องมีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีราคาต่อหน่วยสูงที่สุด รูปที่ 5 แสดงกราฟซึ่งสร้างจากแบบจำลองที่มี 4 ตัวแปร เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อกำลังอัดของคอนกรีตบล็อก พบว่ากำลังอัดเพิ่มตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ในกรณีที่อัตราส่วนทรายต่อมวลรวมหยาบ (S/M) เพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังอัดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราส่วน S/M เพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณทรายเพิ่มขึ้นแต่ปริมาณหินฝุ่นจะลดลง ส่งผลให้ความแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลง จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกลดลง

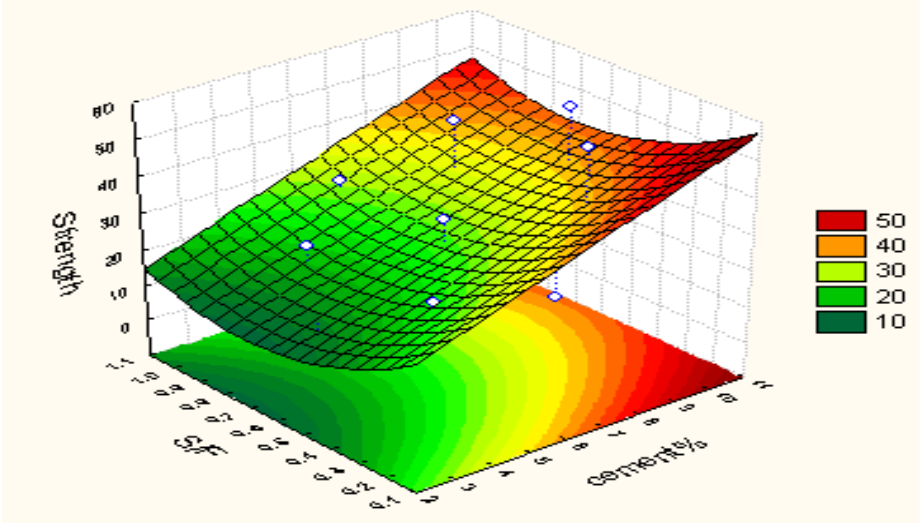
จากกราฟระหว่าง กำลังอัดและอัตราส่วนหินฝุ่นต่อหินเกล็ด (F/R) แสดงว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามค่า F/R ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณหินฝุ่นเพิ่มขึ้นจะทำให้คอนกรีตบล็อกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อพิจารณาความชันของกราฟ พบว่าหินเกล็ดมีผลน้อยมากต่อกำลังอัด ดังนั้นสามารถสรุปว่า ค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรคือ S/M=0.2 และ F/R=2.0 ส่วนปริมาณปูนซีเมนต์น้อยที่สุด ที่ได้กำลังอัดมากกว่า 25.48 กก./ตร.ซม. เพื่อให้ผ่าน

มาตรฐาน มอก. 58-2533 หาจากการวิเคราะห์ พื้นผิวผลตอบ (response surface) ของกำลังอัด

สำหรับคอนกรีตบล็อกที่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสมใช้สมการที่ 2 ในการสร้างพื้นผิวผลตอบ และคอนกรีตบล็อกที่ไม่มีหินเกล็ดเป็นส่วนผสมใช้สมการที่ 4 ตัวอย่างพื้นผิวผลตอบแสดงในรูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังตารางที่ 7 จากตารางพบว่าส่วนผสมที่สามารถผลิตคอนกรีตบล็อกได้สูงสุดต่อปูนซีเมนต์ 1 ถุง คือส่วนผสมที่ 2 ซึ่งผลิตคอนกรีตบล็อกได้ประมาณ 167 ก้อน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมที่มีและไม่มีหินเกล็ด พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ยกเว้นส่วนผสมที่ 3 ซึ่งผลิตได้เพียง 128 ก้อน ต่อปูนซีเมนต์ 1 ถุง ดังนั้นสำหรับส่วนผสมที่ไม่มีหินเกล็ด การผลิตโดยการควบคุมหน่วยน้ำหนักให้มีค่าสูงจะมีความเหมาะสมมากกว่าเพราะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่าส่วนผสมที่ 3 มาก



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลของตัวแปรแต่ละชนิดต่อกำลังอัดของส่วนผสมที่มีหินเกล็ด



รูปที่ 6 พื้นผิวผลตอบของกำลังอัด จากแบบจำลองที่ 4

ตารางที่ 7 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตบล็อกที่มีและไม่มีหินเกล็ด

Mix	Unit weight (kg/m^3)	Cement content (% by weight)	Mix proportion by volume				Number of block*	Cost (baht/ 1 block)
			Cement	Sand	Crush dust	chipped stone		
1	2150	5.0	1.0	2.6	8.4	4.2	141	1.66
2	>2220	4.1	1.0	3.2	10.3	5.1	167	1.56
3	2050	5.8	1.0	2.1	10.1	-	128	1.64
4	>2150	4.6	1.0	2.7	12.9	-	153	1.54

Note: *Number of concrete block produced from cement 50 kg.

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมโยธาได้เป็นอย่างดี แบบจำลองที่ได้สามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ และส่วนผสมที่ได้จากงานวิจัยนี้มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าส่วนผสมส่วนใหญ่ที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งแสดงว่าการผลิตคอนกรีตบล็อกให้ได้มาตรฐาน ไม่จำเป็นต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูงกว่าส่วนผสมทั่วไป ส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกที่เหมาะสมมีทั้งสิ้น 4 ส่วนผสม ความเหมาะสมของแต่ละส่วนผสมขึ้นอยู่กับวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต โดยส่วนผสมที่มีหินเกล็ด อัตราส่วนโดยปริมาตรที่แนะนำคือ 1 : 3 : 8 : 4 (ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ : หินฝุ่น : หินเกล็ด) เมื่อผลิตด้วยเครื่องแบบเท้าเหยียบ และ 1 : 3 : 10 : 5 เมื่อผลิตด้วยเครื่องแบบไฮดรอลิค สำหรับส่วนผสมที่ไม่มีหินเกล็ด คือ 1 : 2 : 10 (ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ : หินฝุ่น) เมื่อผลิตด้วยเครื่องแบบเท้าเหยียบ และ 1 : 3 : 13 เมื่อผลิตด้วยเครื่องแบบไฮดรอลิค จากการวิจัยพบว่าในกระบวนการผลิตคอนกรีตบล็อกมีเทคนิคการผลิตและข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่จะนำส่วนผสมจากการวิจัยไปใช้งานดังนี้

1) การผลิตคอนกรีตบล็อกโดยใช้ส่วนผสมจากงานวิจัยนี้ใช้ทรายในปริมาณที่น้อยกว่ามวลรวมหยาบมาก ดังนั้นในกรณีที่หินฝุ่นที่ใช้มีปริมาณของหินขนาดเล็กผสมอยู่น้อย อาจทำให้คอนกรีตบล็อกมีรอยร้าวเกิดขึ้นได้ สามารถแก้ไขได้โดยการลดปริมาณหินฝุ่นและเพิ่มปริมาณทราย แต่รักษาอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมให้คงที่ เช่น กรณีที่ใช้ส่วนผสมที่ 4 แล้วเกิดรอยร้าวที่ผิวให้เปลี่ยนอัตราส่วนเป็น 1 : 4 : 11 (ปูนซีเมนต์ : ทรายหยาบ : หินฝุ่น) ซึ่งการทำเช่นนี้ปริมาณปูนซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

2) กำลังอัดที่โครงการวิจัยนี้ใช้ในการวิเคราะห์เป็นกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ดังนั้นในการจัดจำหน่ายหรือการนำไปใช้งานควรมีอายุอย่างน้อย 28 วัน อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองพบว่าในส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐาน กำลังอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน มีค่าต่างกันน้อยมาก ดังนั้นจึงอาจสามารถนำออกจำหน่ายได้ที่อายุ 14 วัน หากต้องการจำหน่ายที่อายุ 7 วัน สามารถทำได้แต่ต้องเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งจะทำให้การพัฒนากำลังของคอนกรีตเร็วขึ้น จากผลการทดลองพบว่ากรณีที่มีปูนซีเมนต์ร้อยละ 6.1 โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วน 1 : 2 : 10 (ปูน : ทราย : หินฝุ่น) โดยปริมาตร มีกำลังอัดที่อายุ 3 วัน เท่ากับ 29.74 กก./ตร.ซม.

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเครือข่ายการวิจัยภาคเหนือตอนล่างสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยในโครงการนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] P. Vorasunttharosoth, "Construction Materials", SE-ED Co., LTD, Bangkok, 1995, pp.136-141. (in Thai)

[2] P. Soonthonsmai, "Engineering materials of construction", H.N. Group, Bangkok, 1987. (in Thai)

[3] U. Kanchanaworawong., "Materials Testing", Sky Book, Bangkok, 2002. (in Thai)

[4] TIS 58-2533, "Standard for Hollow Non-Load Bearing Concrete Masonry Units", Thai Industrial Standards Institute, ISBN 974-8111-71-7. (in Thai)

[5] C. Leh, G. Andrzej and L. Pawel, "Optimization of Polymer Concrete Composites", Final Report NISTIR 6361, Warsaw University of Technology, 1999.

[6] A. Ghezal and K.H. Khayat, "Optimizing Self-Consolidating Concrete with Limestone Filler by Using Statistical Factorial Design Methods", ACI Material Journal, 99, 2002, pp.264-272.

[7] M. Lachemi, K.M.A. Hossain, V. Lambros and N. Bouzoubaa, "Development of Cost-Effective Self-Consolidating Concrete Incorporating Fly Ash, Slag Cement, or Viscosity-Modifying Admixtures", ACI Material Journal, 100, 2003, pp.419-425.

[8] M. Sonebi, "Applications of Statistical Models in Proportioning Medium-Strength Self-Consolidating Concrete", ACI Material Journal, 101, 2004, pp.339-346.

[9] P. Chutima, "Engineering Experimental Design", Chulalongkorn University Press, Bangkok, 2002.

[10] G.E.P. Box, E.G. Hunter and J.S. Hunter, Statistics for Experimenters, "An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building", John Wiley & Sons, New York – Toronto, 1976.

[11] S. Ghosh, "Statistical Design and Analysis of Industrial Experiments", Marcel Dekker, Inc, New York, 1990.

[12] TIS 109-2517, "Standard for Sampling and Testing Concrete Masonry Units", Thai Industrial Standards Institute. (in Thai)

[13] S. Tongaroonsri, "Research and development of the manufacturing process of concrete block to be highly effective and accountable strategy of investment, quantity and profit", Final report, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak, Thailand, 2005.