



ผลกระทบของการเลือกใช้วัสดุต่อราคาต่ำสุดสำหรับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม ด้วยวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

Effect of Materials Selection on the Minimum Cost for Optimal Design of Reinforced Concrete Beams Using Hill Climbing Algorithm

สมบัติ หัสจารย์¹, อลงกรณ์ ละม่อม^{2*} และ เรืองรุชดี ชีระโรจน์³

Sombut Hassajan¹, Alongkorn Lamom^{2*} and Raungrut Cheerarot³

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

* Correspondent author, E-mail: alongkorn_lamom@hotmail.com

Received February 13, 2012

Accepted June 1, 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการเลือกใช้วัสดุต่อราคาต่ำสุด สำหรับการเลือกขนาดหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวย่างเหมาะสมด้วยวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึม โดยหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวยรับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่นสม่ำเสมอได้รับการตรวจสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย วิธีกำลัง (ว.ส.ท. 1008-38) และคำนวณราคารวมของคานจากราคาวัสดุและค่าแรง ผลการศึกษาพบว่า การเลือกใช้ชั้นคุณภาพของเหล็กเสริมมีผลกระทบต่อราคาต่ำสุดของคานมากกว่าการเลือกใช้กำลังอัดของคอนกรีต เมื่อพิจารณาการใช้ชั้นคุณภาพของเหล็กเสริมพบว่า การเลือกใช้เหล็กเสริม SD40 ได้ราคารวมคานต่ำกว่าการเลือกใช้เหล็กเสริม SD30 ในทุกค่ากำลังอัดของคอนกรีต จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมสามารถช่วยในการศึกษาผลกระทบของการเลือกใช้วัสดุสำหรับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวย่างเหมาะสมได้

Abstract

This research is to study the effect of materials selection on the minimum cost for optimal design of reinforced concrete simple beams using Hill Climbing Algorithm. Cross sections of simply supported beams under uniform load were designed for bending and shear strength according to standard of the Engineering Institute of Thailand (E.I.T. 1008-38 strength design method). The total cost of beams was calculated from materials and labor costs. From the study, it was found that the selection of steel grade affected the minimum cost of beams more than that of compressive strength of concrete. Considering the selection of steel grade, it can be seen that SD40

gave the lower minimum total cost than that of SD30 for all compressive strength levels. From the result, it can be concluded that the Hill Climbing Algorithm can help to study the effect of materials selection on the minimum cost for optimal design of reinforced concrete simply supported beams.

คำสำคัญ: การออกแบบอย่างเหมาะสม คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ฮิลล์คลimbing อัลกอริทึม

Keywords: Optimization, Reinforced concrete beam, Hill Climbing Algorithm

1. บทนำ

อาคารที่ก่อสร้างโดยส่วนใหญ่ในประเทศไทย เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่งในการก่อสร้างคือการคำนวณออกแบบ เนื่องจากการรวบรวมวิธีการและรายละเอียดเพื่อสร้างแบบรูปรายการที่นำไปใช้ในการก่อสร้างจริงได้ โดยเป้าหมายในการออกแบบก่อสร้างคือ ให้โครงสร้างรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย ถูกต้องตามข้อกำหนดการออกแบบ และประหยัดที่สุด สำหรับการคำนวณออกแบบโดยทั่วไปวิศวกรหรือผู้ออกแบบมักออกแบบโดยไม่คำนึงถึงราคาของวัสดุก่อสร้างในช่วงเวลานั้น ทำให้โครงสร้างที่คำนวณได้อาจไม่เหมาะสม จึงมีแนวคิดในการออกแบบอย่างเหมาะสม โดยเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ.1983 (1) ซึ่งในช่วงนั้นใช้หลักการแก้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบ (2-4) แต่วิธีการนี้มีความซับซ้อนและไม่สามารถแก้ปัญหาขนาดใหญ่ได้ ต่อมาเมื่อมีผู้เสนอระเบียบวิธีเชิงเส้นและวิธีการซิมเพล็กซ์ (5-9) เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนในการแก้สมการหาคำตอบ ขณะเดียวกันก็เกิดแนวคิดในการแก้ปัญหาโดยการหาคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุด แต่วิธีการนี้เป็นเรื่องที่ยากและเสียเวลามาก เพื่อแก้ปัญหา จึงมีการใช้วิธีการแบบฮิวริสติกซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบที่ใช้ความรู้ที่ไม่สมบูรณ์หรือการคาดเดาอย่างมีเหตุผล (10,11) เช่นวิธีฮิลล์คลimbing การจำลองการอบเหนียว (12,13) เจเนติกอัลกอริทึม (14-20) สำหรับวิธีฮิลล์คลimbing อัลกอริทึม (21,22) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีขั้นตอนการทำงานง่าย ไม่ซับซ้อน และจากการศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีฮิลล์คลimbing อัลกอริทึมในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม (22) พบว่า ฮิลล์คลimbing อัลกอริทึมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมได้

โดยได้ราคาที่ประหยัดกว่าการคำนวณด้วยวิธีทั่วไป

แม้ว่าจะมีการศึกษาการประยุกต์ใช้ฮิลล์คลimbing อัลกอริทึม ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม โดยระบุค่ากำลังอัดคอนกรีตและชั้นคุณภาพเหล็กเสริม แต่ในการออกแบบทั่วไปผู้ออกแบบจะระบุชั้นคุณภาพเหล็กเสริมและค่ากำลังอัดคอนกรีตตามประสบการณ์ ทำให้อาจไม่ได้ราคาค่าก่อสร้างที่ต่ำสุดหรือเหมาะสม และยังไม่มีการศึกษาผลของการใช้ชั้นคุณภาพเหล็กเสริมและค่ากำลังอัดคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลจากการเลือกใช้ชั้นคุณภาพเหล็กเสริมและค่ากำลังอัดคอนกรีตที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพและหาขนาดหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม โดยใช้ราคารวมของคานเป็นฟังก์ชันเป้าหมาย ด้วยวิธีฮิลล์คลimbing อัลกอริทึม

2. วิธีการวิจัย

2.1 ทฤษฎีการออกแบบ

ในการศึกษาค้นคว้าจะคำนวณความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของหน้าตัดคานตามมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย วิธีกำลัง (ว.ส.ท.1008-38) (23) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การคำนวณโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้น

น้ำหนักบรรทุกทุก (w) คำนวณจาก

$$w = 1.4DL + 1.7LL$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

$$Mu = wL^2 / 8$$

แรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

$$Vu = wl / 2$$

เมื่อ

DL คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่

LL คือ น้ำหนักบรรทุกจร

l คือ ความยาวช่วงคาน

2.2.2 ปริมาณเหล็กเสริมในคาน

ปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุดเท่ากับ

$$\rho_{min} = \text{Max} \left(\frac{0.794 \sqrt{f'_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right)$$

โดยปริมาณเหล็กเสริมในคานสำหรับเหล็กเสริมรับแรงดึง

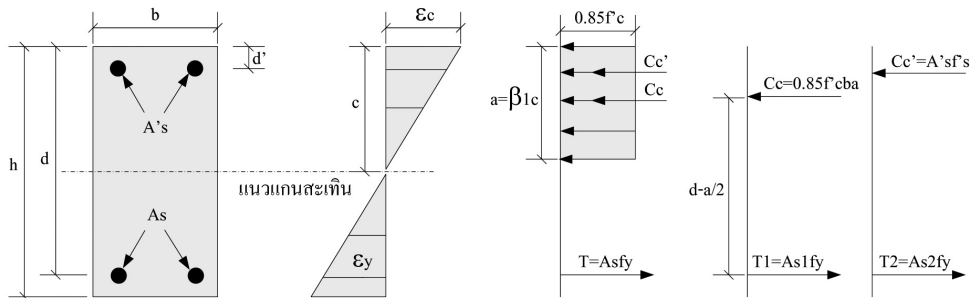
$$\rho = \frac{A_s}{bd}$$

สำหรับเหล็กเสริมรับแรงอัด

$$\rho' = \frac{A'_s}{bd}$$

2.2.3 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด

เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกหรือแรงกระทำคานจะเกิดการดัด ส่งผลให้เกิดหน่วยแรงและความเครียดบนหน้าตัดคาน ซึ่งอาจเป็นหน่วยแรงอัดหรือดึง ขณะเดียวกันก็อาจเป็นความเครียดที่ทำให้ทองคำคาร์บอนหรือหด นอกจากนั้นการดัดยังทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนด้วยในการคำนวณออกแบบหน้าตัดของคอนกรีตและเหล็กเสริมเพื่อต้านทานแรงอัดและแรงดึง โดยที่แรงอัด และแรงดึงในหน้าตัดคานเป็นแรงคู่ควบที่สมดุล ดังแสดงในรูปที่ 1



(a) รูปตัดคาน (b) การกระจายของความเครียด (c) การกระจายของหน่วยแรง (d) แรงอัดจากคอนกรีต (e) แรงอัดจากเหล็กเสริม

รูปที่ 1. หน่วยแรง และความเครียดบนหน้าตัดคานภายใต้แรงดัด

2.2.3.1 การคำนวณโมเมนต์คานเสริม

เหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

ปริมาณเหล็กเสริมสูงสุด

$$\rho_{max} = 0.75 \rho_b$$

ปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุล

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f'_c (6120)}{f_y (6120 + f_y)}$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

เมื่อ

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b}$$

$$f'_c \leq 280 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \beta_1 = 0.85$$

$$280 < f'_c \leq 560 \text{ กก./ซม.}^2 \quad \beta_1 = 0.85 - \frac{0.05(f'_c - 280)}{70}$$

2.2.3.2 การคำนวณโมเมนต์คานเสริม

เหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

การคำนวณหน่วยแรงในเหล็กรับแรงอัด f'_s จะพิจารณาจากความเครียด ϵ'_s โดยใช้กฎสามเหลี่ยมคล้าย ในรูปที่ 1 โดยเหล็กรับแรงอัดจะถึงจุดครากเมื่อ ϵ'_s มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $\epsilon_y = f_y / E_s$

$$\epsilon'_s = 0.003 \left(1 - \frac{d'}{c} \right) \geq \epsilon_y \quad \text{หรือ}$$

$$0.003 \left(1 - \frac{0.85 f'_c \beta_1 d'}{(\rho - \rho') f_y d} \right) \geq \frac{f_y}{E_s}$$

ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดจะถึงจุดครากเมื่อ

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \beta_1 f'_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

เมื่อเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก $f'_s = f_y$
ปริมาณเหล็กเสริมสูงสุด

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y}$$

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b}$$

กำลังต้านทานโมเมนต์คานของหน้าตัด

$$M_n = (A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d')$$

เมื่อเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่คราก $f'_s > f_y$
คำนวณหน่วยแรงเหล็กเสริมรับแรงอัด

$$f'_s = \frac{6120(c - d')}{c}$$

ปริมาณเหล็กเสริมสูงสุด

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y}$$

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b}$$

กำลังต้านทานโมเมนต์คานของหน้าตัด

$$M_n = (A_s f_y - A'_s f'_s) \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d')$$

2.2.4 การคำนวณกำลังต้านแรงเฉือนของ

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

สามารถคำนวณออกแบบเหล็กเสริมทางขวางได้ดังนี้

1. จากคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กำหนด b_w, d, f'_c, f_y ให้ค่าแรงเฉือนที่กระทำ V_u ซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำคูณด้วยตัวคูณเพิ่มค่าแล้ว

2. หากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต ΦV_c โดยที่ $V_c = 0.53(\sqrt{f'_c} b_w d)$ และ $\Phi = 0.85$

3. ถ้า $V_u - \Phi V_c > 2.1(\sqrt{f'_c} b_w d)$ ให้ทำการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดใหม่และถ้า $V_u < \Phi V_c / 2$ ไม่ต้องเสริมเหล็กทางขวาง ทั้งนี้ต้องเสริมเหล็กตามขวางตามมาตรฐาน ว.ส.ท.

4. ถ้า $\Phi V_c / 2 < V_u < \Phi V_c$ ให้ใช้ปริมาณเหล็กเสริมทางขวางอย่างน้อยเท่ากับ $A_v \min \geq 3.5 b_w s / f_y$ โดยเรียงเหล็กผูกตั้งห่างได้ไม่เกิน $A_v f_y / 3.5 b_w$ หรือ 0.5d หรือ 60 ซม.

5. ถ้า $V_u > \Phi V_c$ แต่ $V_u - \Phi V_c \leq 1.1(\sqrt{f'_c} b_w d)$ ระยะเรียงของเหล็กผูกตั้งมีระยะเรียงห่างกันได้ไม่เกิน 0.5d หรือ 60 ซม. แต่ถ้า $1.1(\sqrt{f'_c} b_w d) < V_u - \Phi V_c \leq 2.1(\sqrt{f'_c} b_w d)$ ให้ระยะเรียงของเหล็กผูกตั้งห่างกันได้ไม่เกิน 0.25d หรือ 30 ซม.

ทั้งนี้ค่าของหน่วยแรงที่ยอมให้ใช้ต้องไม่เกินกว่า 27 กก./ซม.² และกำลังที่จุดคราก f_y ของเหล็กเสริมทางขวางที่ใช้ต้องไม่เกินกว่า 4200 กก./ซม.²

2.2 ขอบเขตของการวิจัย

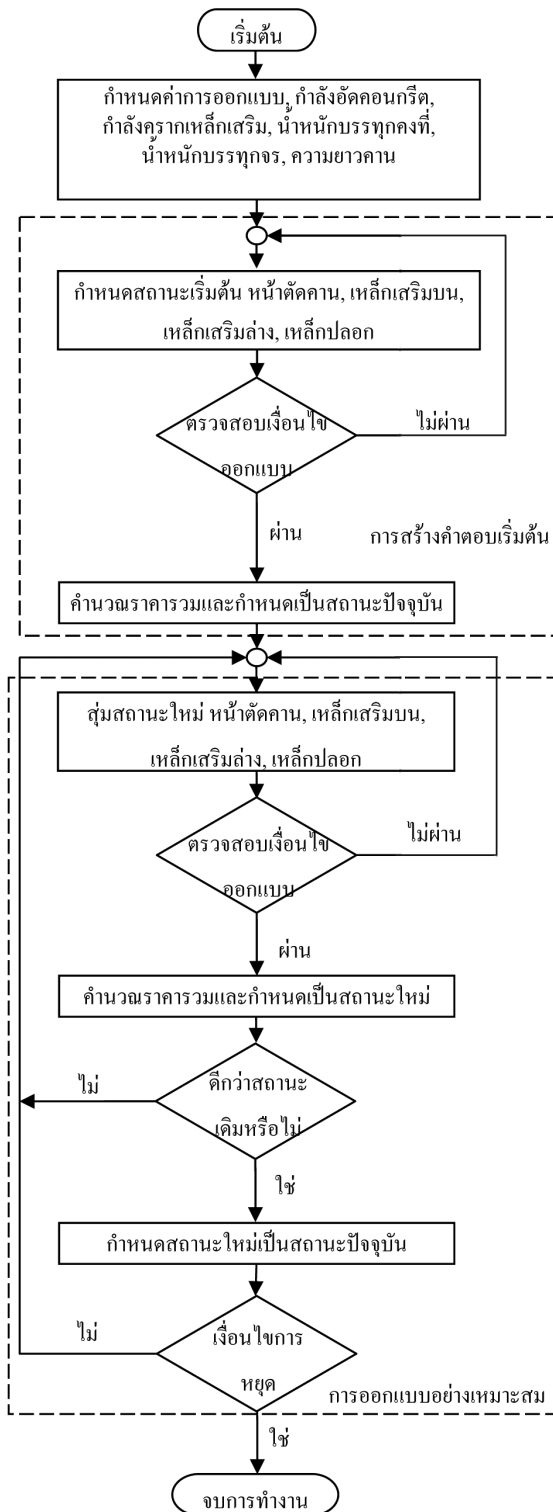
1. ศึกษาในกรณีคานช่วงเดียวรับน้ำหนักบรรทุกแผ่สม่ำเสมอ
2. ตรวจสอบการรับโมเมนต์คัตและแรงเฉือนของหน้าตัดคานตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย วิธีกำลัง (ว.ส.ท.1008-38) (23)
3. เหล็กเสริมรับแรงเฉือนใช้เหล็กเส้นกลมขนาด 6 และ 9 มม. ชั้นคุณภาพ SR24
4. เหล็กเสริมหลักใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 12, 16, 20, 25 และ 28 มม. ชั้นคุณภาพ SD30 และ SD40
5. ใช้ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ 180, 210, 240, 280, 300 และ 320 กก./ซม.²
6. กำหนดขนาดหน้าตัดคานในช่วงกว้าง 15 ถึง 30 ซม. ลึก 25 ถึง 60 ซม. โดยเปลี่ยนขนาดหน้าตัดครั้งละ 5 ซม.
7. จัดรูปแบบเหล็กเสริมไม่เกิน 2 ชั้น สำหรับกลุ่มเหล็กเสริมบนและล่าง แต่ละชั้นเสริมเหล็กไม่เกิน 5 เส้น

2.3 ฮิลโคลมิงอัลกอริทึมสำหรับการเลือกหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม

การนำฮิลโคลมิงอัลกอริทึมมาใช้สำหรับการเลือกขนาดหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม จำเป็นต้องมีการประยุกต์และพัฒนาฮิลโคลมิงอัลกอริทึมเดิม โดยฮิลโคลมิงอัลกอริทึมสำหรับการเลือกขนาดหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมแสดงดังรูปที่ 2 และมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

(22)

1. เริ่มต้น กำหนดค่าการออกแบบต่างๆ กำลังอัดคอนกรีต (f'_c) กำลังครากเหล็กเสริม (f_y) น้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL) น้ำหนักบรรทุกจร (LL) และความยาวคาน (L)
2. สร้างขนาดหน้าตัดคาน เหล็กเสริมบน เหล็กเสริมล่าง เหล็กปลอกเริ่มต้น และตรวจสอบเงื่อนไขออกแบบ
 - 2.1 ถ้าผ่าน คำนวณราคารวมและกำหนดให้เป็นสถานะปัจจุบัน
 - 2.2 ถ้าไม่ผ่าน กำหนดสถานะเริ่มต้นใหม่จนผ่านเงื่อนไขออกแบบ
3. สุ่มสร้างขนาดหน้าตัดคาน เหล็กเสริมบน เหล็กเสริมล่าง เหล็กปลอกใหม่ และตรวจสอบเงื่อนไขออกแบบ
 - 3.1 ถ้าผ่าน คำนวณราคารวมและกำหนดให้เป็นสถานะใหม่
 - 3.2 ถ้าไม่ผ่าน สุ่มสร้างขนาดหน้าตัดคาน เหล็กเสริมบน เหล็กเสริมล่าง และเหล็กปลอกใหม่จนผ่านเงื่อนไขออกแบบ
4. เปรียบเทียบสถานะใหม่กับสถานะปัจจุบัน
 - 4.1 ถ้าสถานะใหม่ดีกว่าสถานะปัจจุบัน กำหนดให้สถานะใหม่เป็นสถานะปัจจุบัน
 - 4.2 ถ้าสถานะใหม่ไม่ดีกว่าสถานะปัจจุบัน ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3
5. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด
 - 5.1 ถ้าใช่ จบการทำงานคำตอบสุดท้ายคือผลลัพธ์
 - 5.2 ถ้าไม่ใช่ ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3
6. จบการทำงาน



รูปที่ 2. ฟังก์ชันตอนการเลือกขนาดหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วยวิธีอัลกอริทึม

2.4 สมการเป้าหมาย

การศึกษาครั้งนี้กำหนดให้ราคารวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งประกอบด้วยราคาวัสดุและค่าแรง ของคอนกรีต แบบหล่อ เหล็กเสริมและเหล็กปลอก เป็นสมการเป้าหมาย (22) คือ

$$F = V_C \cdot C_C + A_F \cdot C_F + W_S \cdot C_S + W_{SV} \cdot C_{SV}$$

- เมื่อ F : ราคารวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
 V_C : ปริมาตรของคอนกรีต
 C_C : ราคาคอนกรีตและค่าแรงคอนกรีต
 A_F : ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต
 C_F : ราคาแบบหล่อคอนกรีตและค่าแรงแบบหล่อคอนกรีต
 W_S : น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม
 C_S : ราคาเหล็กเสริมและค่าแรงเหล็กเสริม
 W_{SV} : น้ำหนักรวมของเหล็กปลอก
 C_{SV} : ราคาเหล็กปลอกและค่าแรงเหล็กปลอก

ซึ่งปริมาตรของคอนกรีต ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต และน้ำหนักรวมของเหล็กเสริมและเหล็กปลอก จะขึ้นอยู่กับตัวแปรในการออกแบบ ส่วนราคาวัสดุและค่าแรงของวัสดุแต่ละประเภท กำหนดดังตารางที่ 1

2.5 ตัวแปรออกแบบ

ตัวแปรออกแบบจะสร้างไว้ในรูปแบบของฐานข้อมูลที่เป็นไปได้ตามขอบเขตของการศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรจำนวน 4 ตัวแปร คือ ขนาดหน้าตัดคาน เหล็กเสริมบน เหล็กเสริมล่าง และเหล็กปลอก สำหรับขนาดหน้าตัดคานจะมีรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมด 23 รูปแบบ เหล็กเสริมบนและเหล็กเสริมล่างจำนวน 161 รูปแบบ และเหล็กปลอกจำนวน 17 รูปแบบ เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการสุ่มสร้างคำตอบในแต่ละรอบการคำนวณ โดยกำหนดช่วงของการสุ่มให้เป็นไปได้ทั้งขึ้นและลงจากคำตอบปัจจุบัน สำหรับหน้าตัดคานค่าสุ่มคือ -5 ถึง 5 เหล็กเสริมบนและเหล็กเสริมล่างค่าสุ่มคือ -10 ถึง 10

ส่วนเหล็กปลอกค่าสุ่มคือ -5 ถึง 5

2.6 การตรวจสอบเงื่อนไขออกแบบ

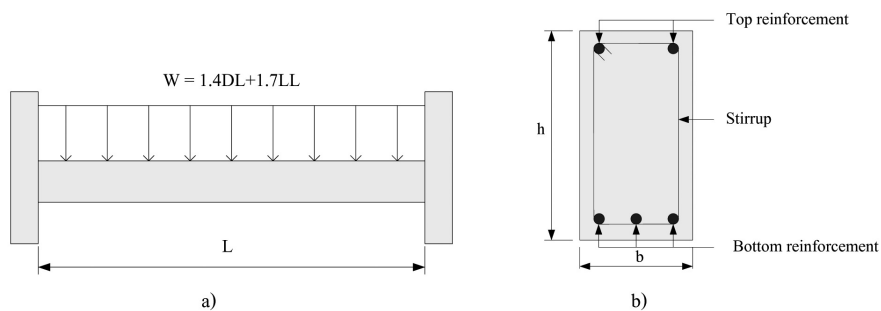
1. วิเคราะห์โครงสร้าง ตามน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกที่ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดหน้าตัดคานในแต่ละรอบการคำนวณ
2. ตรวจสอบความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคาน โดยที่ $\phi M_n \geq M_u$
3. ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริมในคาน โดยที่ $\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max}$
4. ตรวจสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน โดยที่ $\phi V_n \geq V_{ud}$ และระยะห่างของเหล็กปลอก $S_v \leq S_{max}$
5. ตรวจสอบระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม โดยที่ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมต้องมากกว่าระยะห่างน้อยสุด

2.7 เงื่อนไขการหยุด

การตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด จะเป็นการนับจำนวนซ้ำของคำตอบ ซึ่งเมื่อคำตอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือให้ค่าซ้ำกันจำนวน 3 ครั้งก็หยุดการคำนวณและคำตอบสุดท้ายคือผลลัพธ์

2.8 ตัวอย่างทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ ยกตัวอย่างคานจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่มีความยาวช่วงคานตั้งแต่ 5.0 – 7.0 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรแตกต่างกัน ทั้งนี้ในการคำนวณหาโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะรวมน้ำหนักของคานเข้ากับน้ำหนักบรรทุกคงที่ด้วย โดยตัวอย่างคานแสดงในรูปที่ 3 และรายละเอียดคานแสดงในตารางที่ 2 สำหรับราคาวัสดุใช้ราคาวัสดุจากสำนักงานพาณิชย์จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประจำเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2554 และค่าแรงใช้ค่าแรงจากบัญชีค่าแรง/ค่าเงินค่าจ้างสำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างกระทรวงการคลัง รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 3. คานสำหรับตัวอย่างทดสอบ a) คานตามยาว b) หน้าตัดคาน

ตารางที่ 1. ราคาวัสดุและค่าแรงต่อหน่วย

Material		Cost of material	Cost of labor	Total cost	Unit
Concrete (f'_c, ksc)	180	2,470	305	2,775	baht/m ³
	210	2,510	305	2,815	
	240	2,550	305	2,855	
	280	2,630	305	2,935	
	300	2,680	305	2,985	
Reinforcement	SR24	24.72	2.68	27.40	baht/kg
	SD30	22.86	2.68	25.54	
	SD40	23.02	2.68	25.70	
Formwork		417	103	520	baht/m ²

ตารางที่ 2. รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

Examples	1	2	3
L (m)	5.0	6.0	7.0
DL (kg/m)	1,600	1,850	2,250
LL (kg/m)	475	1,150	1,250

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1 ผลทดสอบตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างที่ 1 เป็นคานช่วงเดียวรับ DL = 1,600 กก./ม. รับ LL = 475 กก./ม. ความยาวช่วงคาน 5.0 ม. ผลการทดสอบการใช้เหล็กเสริม SD30 พบว่าได้ราคา

รวมคานต่ำสุดเมื่อใช้ค่า = 280 กก./ชม.² ราคา รวม 5,681 บาท และมีราคา รวมสูงสุดเมื่อใช้ค่า $f'_c = 180$ กก./ชม.² ราคา รวม 5,854 บาท ส่วนการใช้เหล็กเสริม SD40 พบว่าได้ราคา รวมคานต่ำสุดเมื่อใช้ค่า $f'_c = 180$ กก./ชม.² ราคา รวม 5,062 บาท และมีราคา รวมสูงสุดเมื่อใช้ค่า $f'_c = 320$ กก./ชม.² ราคา รวม 5,143 บาท ดังแสดงในตารางที่ 3-4 สำหรับการเปรียบเทียบราคา รวมคาน

ระหว่างการใช้เหล็กเสริม SD30 กับ SD40 พบว่า การใช้เหล็กเสริม SD40 จะทำให้ได้ราคารวมคานต่ำกว่าเหล็กเสริม SD30 อยู่ร้อยละ 12.23 เนื่องจากโมเมนต์คัตที่หน้าคัตรับได้ (ΦM_n) จะขึ้นอยู่กับค่า $A_s, f_y, d, A'_s, f'_s, d', f'_c$ และ b ซึ่งค่าเหล่านี้ยิ่งเพิ่มขึ้น ก็ยิ่งทำให้โมเมนต์ที่หน้าคัตรับได้มีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นที่ความต้องการรับโมเมนต์เท่ากัน การใช้เหล็กเสริม SD40 จึงทำให้ได้ขนาดหน้าคัตคานและพื้นที่เหล็กเสริมลดลง และด้วยราคาที่สูงกว่า SD30 ไม่มาก ราคารวมคานเมื่อใช้เหล็กเสริม SD40

จึงต่ำกว่าการใช้เหล็กเสริม SD30

และหากพิจารณาจากกรณีใช้เหล็กเสริม SD40 เมื่อเพิ่มค่า f'_c ราคารวมคานก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากที่ความต้องการรับโมเมนต์ที่ไม่มากนัก (10,300 กก.-ม.) ค่า f'_c ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลให้ขนาดหน้าคัตคานและปริมาณเหล็กเสริมเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ได้หน้าคัตคานแบบเดิม แต่ราคารวมคานเพิ่มขึ้นตามราคา

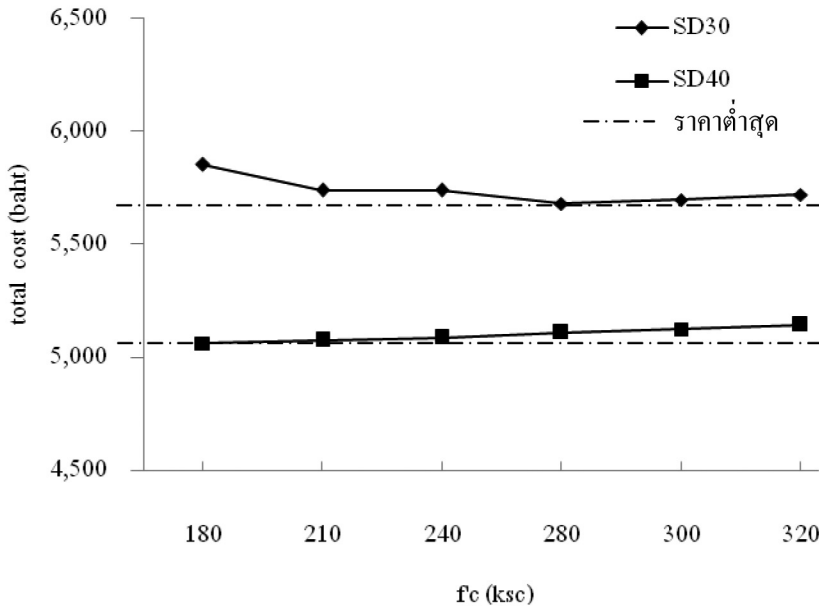
คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 3. ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้เหล็กเสริม SD30

detail	f _c (ksc)					
	180	210	240	280	300	320
Section beam b : h (cm)	20:40	20:40	20:40	20:35	20:35	20:35
Top reinforcement	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
Bottom reinforcement	2-DB25+	2-DB25+	3-DB20,	3-DB25	3-DB25	3-DB25
	1-DB20	1-DB20	3-DB12			
Stirrup	RB6	RB6	RB6	RB6	RB6	RB6
	@0.10m	@0.15m	@0.15m	@0.10m	@0.10m	@0.10m
Number of analyses	7,638	8,751	5,996	12,817	8,436	8,045
Time used (s)	5.20	5.54	4.62	7.00	5.45	5.35
Total cost (baht)	5,854	5,740	5,740	5,681	5,698	5,719

ตารางที่ 4. ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้เหล็กเสริม SD40

detail	f _c (ksc)					
	180	210	240	280	300	320
Section beam b: h (cm)	15:40	15:40	15:40	15:40	15:40	15:40
Top reinforcement	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
Bottom reinforcement	2-DB25	2-DB25	2-DB25	2-DB25	2-DB25	2-DB25
Stirrup	RB6	RB6	RB6	RB6	RB6	RB6
	@0.10m	@0.10m	@0.10m	@0.10m	@0.10m	@0.10m
Number of analyses	6,379	8,214	17,223	15,341	9,257	15,505
Time used (s)	4.72	6.36	9.04	8.94	6.01	8.53
Total cost (baht)	5,062	5,074	5,086	5,110	5,125	5,143



รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างราคารวมคาน กับ f_c สำหรับตัวอย่างที่ 1

3.2 ผลทดสอบตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 2 เป็นคานช่วงเดียวรับ DL = 1,850 กก./ม. รับ LL = 1,150 กก./ม. ความยาวช่วงคาน 6.0 ม. ผลการทดสอบกับเหล็กเสริม SD30 พบว่าได้ราคารวมคานต่ำสุดเมื่อใช้ค่า $f_c = 280$ กก./ชม.² ราคา รวม 9,460 บาท และมีราคา รวมสูงสุดเมื่อใช้ค่า $f_c = 180$ กก./ชม.² ราคา รวม 9,830 บาท ส่วนการใช้เหล็กเสริม SD40 พบว่า ได้ราคา รวมคานต่ำสุดเมื่อใช้ค่า $f_c = 210$ กก./ชม.² ราคา รวม 8,845 บาท และมีราคา รวมสูงสุดเมื่อใช้ค่า $f_c = 180$

กก./ชม.² ราคา รวม 9,020 บาท ดังแสดงในตารางที่ 5-6

สำหรับการเปรียบเทียบราคา รวมคาน ระหว่างการใช้เหล็กเสริม SD30 กับ SD40 พบว่าการใช้เหล็กเสริม SD40 จะทำให้ได้ราคา รวมคานต่ำกว่า SD30 อยู่ร้อยละ 6.95 ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

และหากพิจารณาจากกรณีการใช้เหล็กเสริม SD40 จะได้ราคา รวมคานต่ำสุดเมื่อใช้ค่า $f_c = 280$ กก./ชม.² ซึ่งแม้จะเพิ่มค่า f_c ให้มากขึ้นไม่ส่งผลให้ขนาดหน้าตัดคานและปริมาณเหล็กเสริมเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ได้หน้าตัดคานแบบเดิม แต่ราคา รวมคานเพิ่มขึ้นตามราคา

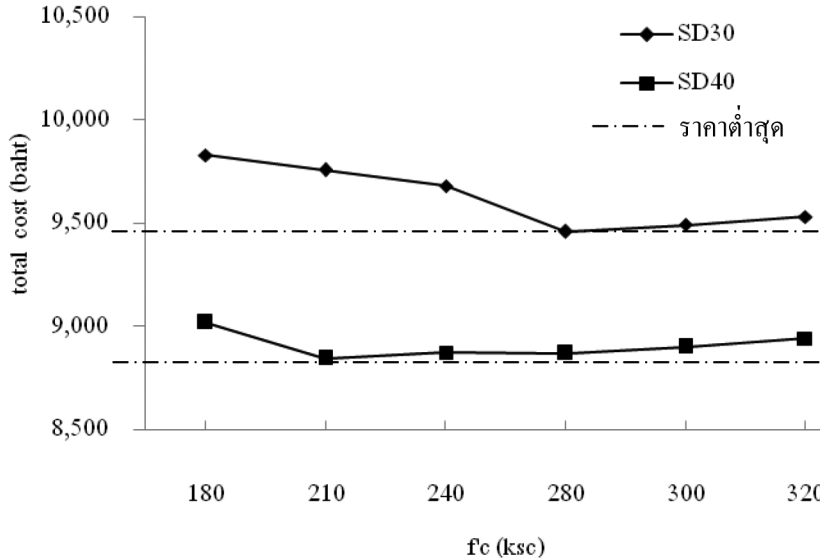
คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 5. ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 2 เมื่อใช้เหล็กเสริม SD30

detail	f _c (ksc)					
	180	210	240	280	300	320
Section beam b : h (cm)	20 : 55	20 : 60	20 : 55	20 : 55	20 : 55	20 : 55
Top reinforcement	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
Bottom reinforcement	3-DB25, 3-DB16	3-DB20, 2-DB20+ 1-DB16	3-DB25, 3-DB16	3-DB25, 2-DB16	3-DB25, 2-DB16	3-DB25, 2-DB16
Stirrup	2-RB6 @0.15m	RB6 @0.10m	RB6 @0.10m	RB6 @0.10m	RB6 @0.10m	RB6 @0.10m
Number of analyses	17,789	4,920	10,007	5,143	7,596	12,979
Time used (s)	12.22	4.85	6.36	4.74	6.50	8.64
Total cost (baht)	9,830	9,760	9,682	9,460	5,493	9,532

ตารางที่ 6. ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 2 เมื่อใช้เหล็กเสริม SD40

detail	f _c (ksc)					
	180	210	240	280	300	320
Section beam b : h (cm)	20 : 55	20 : 55	20 : 55	20 : 55	20 : 55	20 : 55
Top reinforcement	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
Bottom reinforcement	3-DB25	3-DB25	3-DB25	2-DB20+ 1-DB16, 3-DB16	2-DB20+ 1-DB16, 3-DB16	2-DB20+ 1-DB16, 3-DB16
Stirrup	2-RB6 @0.15m	RB6 @0.10m	RB6 @0.10m	RB6 @0.10m	RB6 @0.10m	RB6 @0.10m
Number of analyses	10,909	16,294	2,514	4,892	5,909	9,144
Time used (s)	6.93	9.21	3.63	4.71	5.19	6.79
Total cost (baht)	9,020	8,845	8,872	8,869	8,902	8,942



รูปที่ 5. ความสัมพันธ์ระหว่างราคารวมคาน กับ f_c^I สำหรับตัวอย่างที่ 2

3.3 ผลทดสอบตัวอย่างที่ 3

ตัวอย่างที่ 3 เป็นคานช่วงเดียวรับ $DL=2250$ กก./ม. รับ $LL = 1250$ กก./ม. ความยาวช่วงคาน 7.0 ม. ผลการทดสอบกับเหล็กเสริม SD30 พบว่าได้ราคารวมคานต่ำสุดเมื่อใช้ค่า $f_c^I = 280$ กก./ชม.² ราคารวม 14,159 บาท และมีราคารวมสูงสุดเมื่อใช้ค่า $f_c^I = 210$ กก./ชม.² ราคารวม 15,473 บาท ส่วนการใช้เหล็กเสริม SD40 พบว่าได้ราคารวมคานต่ำสุดเมื่อใช้ค่า $f_c^I = 320$ กก./ชม.² ราคารวม 12,385 บาท และมีราคารวมสูงสุดเมื่อใช้ค่า $f_c^I = 180$ กก./ชม.² ราคารวม 13,625 บาท ดังแสดงในตารางที่ 7-8

สำหรับการเปรียบเทียบราคารวมคาน ระหว่างการใช้เหล็กเสริม SD30 กับ SD40 พบว่าการใช้เหล็กเสริม SD40 จะทำให้ได้ราคารวมคานต่ำกว่า SD30 อยู่ร้อยละ 14.32 ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1 และ 2

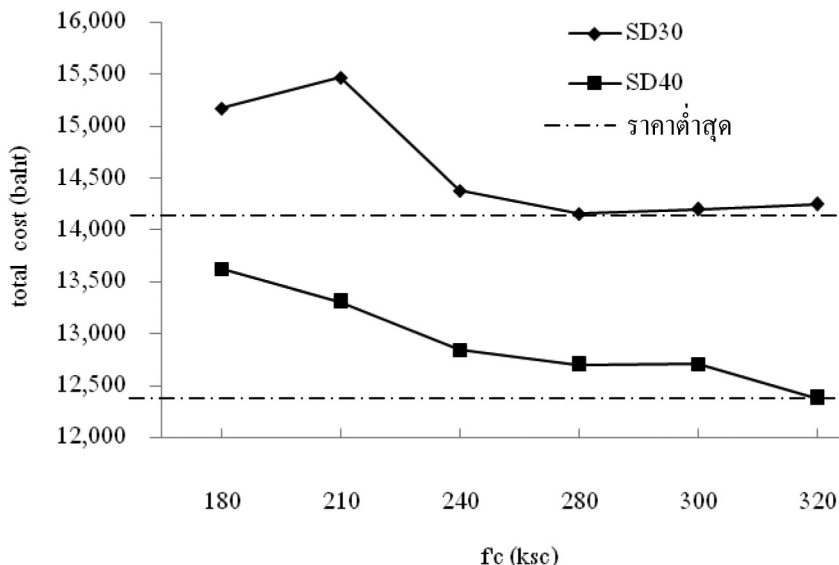
และหากพิจารณาจากกรณีการใช้เหล็กเสริม SD40 เมื่อเพิ่มค่า f_c^I ราคารวมคานมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่ความต้องการรับโมเมนต์ประมาณ 34,700 กก.-ม. เมื่อเพิ่มค่า f_c^I ให้มากขึ้น มีผลให้ขนาดหน้าตัดคานและปริมาณเหล็กเสริมเปลี่ยนแปลงลดลง จึงทำให้ได้หน้าตัดคานและเหล็กเสริมเล็กลง และราคารวมคานที่ต่ำลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 7. ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้เหล็กเสริม SD30

detail	f'c (ksc)					
	180	210	240	280	300	320
Section beam b : h (cm)	20 : 60	20 : 60	25 : 60	20 : 60	20 : 60	20 : 60
Top reinforcement	3-DB20	3-DB20 3-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
Bottom reinforcement	3-DB25, 3-DB25	3-DB25, 2-DB25+ 1-DB20	4-DB25 3-DB20	3-DB25, 3-DB25	3-DB25, 3-DB25	3-DB25, 3-DB25
Stirrup	2-RB6 @0.10m	2-RB6 @0.10m	2-RB6 @0.15m	2-RB6 @0.10m	2-RB6 @0.10m	2-RB6 @0.10m
Number of analyses	22,579	49,482	46,197	19,018	23,265	27,423
Time used (s)	11.28	29.17	28.54	12.18	14.95	18.19
Total cost (baht)	15,178	15,473	14,382	14,159	14,201	14,252

ตารางที่ 8. ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้เหล็กเสริม SD40

detail	f'c (ksc)					
	180	210	240	280	300	320
Section beam b : h (cm)	20 : 60	20 : 60	20 : 60	20 : 60	20 : 55	20 : 60
Top reinforcement	2-DB20	4-DB12 1-DB16	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
Bottom reinforcement	3-DB25, 3-DB16	2-DB25+ 1-DB20, 3-DB20	2-DB25+ 1-DB20, 3-DB20	2-DB25+ 1-DB20, 3-DB20	3-DB25, 3-DB20	3-DB25, 3-DB16
Stirrup	2-RB6 @0.10m	2-RB6 @0.10m	2-RB9 @0.25m	RB9 @0.15m	2-RB6 @0.10m	2-RB6 @0.15m
Number of analyses	20,101	40,987	9,298	33,940	6,547	19,866
Time used (s)	10.69	25.48	7.20	20.22	5.01	12.08
Total cost (baht)	13,625	13,312	12,845	12,701	12,708	12,385



รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างราคารวมคาน กับ f_c สำหรับตัวอย่างที่ 3

3.4 การเปรียบเทียบผลการออกแบบกับวิธีทั่วไป

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นประสิทธิภาพของการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม ด้วยวิธีซิลโคลมิงอัลกอริทึมในการศึกษาครั้งนี้จึงได้เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของการออกแบบด้วยวิธีซิลโคลมิงอัลกอริทึมกับการออกแบบโดยวิธีทั่วไป

(22) โดยวิธีทั่วไปกำหนดใช้เหล็กเสริม SD40 ในทั้ง 3 ตัวอย่างและใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีต 210 กก./ cm^2 จากผลการศึกษาพบว่า วิธีซิลโคลมิงอัลกอริทึมประหยัดกว่าวิธีทั่วไปร้อยละ 14.72 14.89 และ 16.70 ในตัวอย่างที่ 1-3 ตามลำดับ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9. เปรียบเทียบผลการทดสอบวิธีซิลโคลมิงอัลกอริทึมกับวิธีทั่วไป

Examples	1		2		3	
	HCA	Classical	HCA	Classical	HCA	Classical
Section beam b : h (cm)	15 : 40	20 : 40	20 : 55	20 : 60	20 : 60	30 : 60
Top reinforcement	2-DB12	2-DB20	2-DB12	2-DB20	2-DB12	2-DB20
Bottom reinforcement	2-DB25	3-DB20	3-DB25	3-DB20, 2-DB20	3-DB25, 3-DB16	3-DB25, 2-DB20
Stirrup	RB6 @0.10m	RB6 @0.15m	RB6 @0.10m	RB9 @0.20m	2-RB6 @0.15m	RB9 @0.20m
Total cost (baht)	5,062	5,807	8,845	10,162	12,385	14,453
Difference cost	14.72 %		14.89 %		16.70 %	

การออกแบบโดยทั่วไป วิศวกรผู้ออกแบบมักเลือกชั้นคุณภาพเหล็กเสริม และค่ากำลังอัดของคอนกรีตจากประสบการณ์ ซึ่งไม่ได้คำนวณออกแบบอย่างเหมาะสม ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้ชั้นคุณภาพเหล็กเสริมและค่ากำลังอัดคอนกรีตที่แตกต่างกันเพื่อหาขนาดหน้าตัดที่เหมาะสม โดยใช้วิธีซิลโคลมิงอัลกอริทึม ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการประยุกต์และจากผลการทดสอบวิธีซิลโคลมิงอัลกอริทึมได้ราคาต่ำกว่าการออกแบบจากวิธีทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการออกแบบอย่างเหมาะสม โดยยกตัวอย่างการทดสอบกับคานช่วงเดียว จำนวน 3 ตัวอย่าง มีโมเมนต์ที่เกิดขึ้นประมาณ 10,300 กก.-ม. 21,600 กก.-ม. และ 34,700 กก.-ม.

ผลการทดสอบสรุปได้ว่าการเลือกใช้เหล็กเสริม SD40 จะทำให้ได้ราคารวมคานต่ำกว่า SD30 อยู่ร้อยละ 12.23 ในตัวอย่างที่ 1 ร้อยละ 6.95 ในตัวอย่างที่ 2 และ ร้อยละ 14.32 ในตัวอย่างที่ 3 เนื่องจากโมเมนต์คัตที่หน้าตัดรับได้ (ΦM_n) จะขึ้นอยู่กับค่า $A_s, f_y, d, A'_s, f'_s, d', f'_c$ และ b ซึ่งเมื่อความต้องการรับโมเมนต์คัตเท่ากัน การใช้เหล็กเสริม SD40 จะทำให้ได้ขนาดหน้าตัดคาน (b, d) และพื้นที่เหล็กเสริม (A_s) ต่ำกว่าการใช้เหล็กเสริม SD30

สำหรับการเลือกใช้กำลังอัดของคอนกรีต เมื่อทดสอบกับการใช้เหล็กเสริม SD30 ในทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้ราคารวมคานต่ำสุดเมื่อใช้ค่า $f'_c = 280$ กก./ชม.² และเมื่อทดสอบกับการใช้เหล็กเสริม SD40 ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเพิ่มค่า f'_c ราคารวมคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งขนาดหน้าตัดคานและรายละเอียดเหล็กเสริมเป็นหน้าตัดเดียวกันทั้งหมด ราคารวมคานจึงเพิ่มขึ้นตามราคาคอนกรีต ในตัวอย่างที่ 2 ได้ราคารวมคานต่ำสุดเมื่อใช้ค่า $f'_c = 210$ กก./ชม.² ซึ่งแม้จะเพิ่มค่า f'_c จนถึง 320 กก./ชม.² แต่ก็ยังได้ขนาดหน้าตัดคานขนาดเดิม แต่ราคารวมคานเพิ่มขึ้นตามราคาคอนกรีต และในตัวอย่างที่ 3 ราคารวมคานมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า f'_c เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า f'_c ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดหน้าตัดคานและปริมาณเหล็กเสริมลดลง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบของการเลือกใช้ชั้นคุณภาพของเหล็กเสริมและค่ากำลังอัดของคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่า การเลือกใช้ชั้นคุณภาพของเหล็กเสริมมีผลกระทบต่อราคาต่ำสุดของคานมากกว่าการเลือกใช้กำลังอัดของคอนกรีต โดยการเลือกใช้เหล็กเสริม SD40 ได้ราคารวมคานต่ำกว่าการเลือกใช้เหล็กเสริม SD30 ในทุกตัวอย่างที่ค่ากำลังอัดของคอนกรีต 180 210 240 280 300 และ 320 กก./ชม.² ส่วนผลกระทบของการเลือกใช้กำลังอัดของคอนกรีตต่อราคาต่ำสุดพบว่า เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ราคารวมต่ำสุดของคานมีแนวโน้มลดลงจนถึงจุดที่เหมาะสมของกำลังอัดของคอนกรีต จากนั้นเมื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตราคารวมต่ำสุดของคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีซิลโคลมิงอัลกอริทึมสามารถช่วยในการศึกษาผลกระทบของการเลือกใช้วัสดุในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม

5. เอกสารอ้างอิง

- (1) Chamsuwan W. Optimum design of plane steel trusses using genetic algorithm. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University; 2005. Thai.
- (2) Rozvany GIN. and Hampson AJK. Optimum design of prestressed plates. ACI Jornal. 1963; Vol.60.
- (3) Kirsch U. Optimum design of prestressed plates. Jornal Struc Div. ASCE. 1973; Vol.99 : ST6.
- (4) Leroy FL. Optimum singly reinforced concrete sections. ACI J. 1974; 71(11) : 556-8.
- (5) Loov RE. Optimum design of reinforced concrete and prestressed concrete. Advancd in Concrete Slab Technology. First Edition. (n.p.)Pergamon Press Ltd.1980.

- (6) Kirsch U. Multilevel optimum design of reinforced concrete structures. *Eng Optimize*. 1983; 6(4) : 207–12.
- (7) Prakash A, Agarwala SK and Singh KK. Optimum design of reinforced concrete sections. *Comput Struct* 1988; 30(4) : 1009–11.
- (8) Kanagasundram S and Karihaloo BL. Minimum cost design of reinforced concrete structures. *Comput Struct* 1991; 41(6) : 1357–64.
- (9) Al-Salloum YA and Siddiqi GH. Cost optimum design of reinforced concrete beams. *ACI Struct J*. 1994; 91(6) : 647–55.
- (10) Lamom A, Thapchatri T and Rivepiboon W. Heuristic algorithm in optimal discrete structural designs. *American Journal of Applied Sciences*. 2008; 5(8) : 943-951.
- (11) Lamom A. Optimized material size selection algorithm using simulated algorithm technique. Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University; 2007. Thai.
- (12) Ceranic B, Fryer C and Beines RW. An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures. *Computer and structures*. 2001; 79 : 1569-1581.
- (13) Kirkpatrick S, Gelatt JCD and Vecchi MP. Optimization by simulated annealing. *Science*. 1983; 220 : 671-680.
- (14) Goldberg DE. Genetic algorithm in search optimization and machine learning. New York : Addison-Wesley. 1989.
- (15) Coello CCA, Christiansen AD and Santos HF. A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams. *Eng Comput*. 1997; 13 : 185–96.
- (16) Wirat R. Genetic algorithm for the determination of critical truck load patterns in the analysis of girder-type highway bridges. Master of Engineering Thesis, Asian Institute of technology. 1997.
- (17) Govindaraj V and Ramasamy JV. Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using Genetic Algorithms. *Computers and Structures*. 2005; 84 : 34–48.
- (18) Senay A. Cost optimization of three-dimensional beamless reinforced concrete shear-wall systems via genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*. 2009; 36 : 3555–3561.
- (19) Rattanamanee W, Pathumnakul S. Finding solution by genetic algorithm. *KKU Engineering Journal Vol. 30 No. 4 (319-336)*; 2003. Thai.
- (20) Limkamontip W. Using genetic algorithm to design and optimize prestressed concrete beam bridges. Department of Civil Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok; 2005. Thai.
- (21) Alan WJ and Sheldon HJ. A class of convergent generalized hill climbing algorithms. *Applied Mathematics and Computation*. 2002; 125(2-3) : 359-373.
- (22) Hassajan S, Lamom A, Cheerarot R. Optimum design of reinforced concrete beams using hill climbing algorithm. *Annual Concrete Conference*, 7(STR-57-62); 2011. Thai.
- (23) Engineering Institute of Thailand. Standard of reinforced concrete building, strength method (E.I.T. 1008-38). 1997. Thai.