



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.

UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

## การออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสมด้วยฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

## Optimum design of prestressed concrete plank girder using hill climbing algorithm

สัมฤทธิ์ ชมชื่น<sup>1</sup> อลงกรณ์ ละม่อม<sup>2\*</sup><sup>1</sup> นิสิตระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150Samrit Chomchuen<sup>1</sup> Alongkorn Lamom<sup>2\*</sup><sup>1</sup> Graduate student, Faculty of Engineering, Maha Sarakham University Kantarawichai Maha Sarakham 44150<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Engineering, Maha Sarakham University Kantarawichai Maha Sarakham 44150

\* Corresponding author.

E-mail: alongkorn\_lamom@hotmail.com; Telephone: 0837199995

วันที่รับบทความ 15 มิถุนายน 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 31 สิงหาคม 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 30 ธันวาคม 2563;

วันที่ตอบรับบทความ 11 มกราคม 2564

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึมสำหรับออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม เพื่อหาตัวแปรออกแบบตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย วสท. ด้วยวิธีกำลัง สำหรับรถบรรทุกทุกแบบ 2553 ปี 34-1009HSตาม 44 – 20 มาตรฐานAASHTO LRFD 1992 อัลกอริทึมถูกพัฒนาด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก ตัวอย่าง 3 และทดสอบกับตัวอย่างที่ใช้บ่อย 0.6 เป็นคานช่วงเดียวมีฐานรองรับแบบง่ายแตกต่างกันที่ช่วงความยาวของคาน มีฟังก์ชันเป้าหมายคือหาราคาต่ำสุด ตัวแปรออกแบบประกอบด้วย กำลังของคอนกรีต ( $f_c'$ ) จุดครากของเหล็กเสริม ( $f_y$ ) กำลังดึงประลัยของลวดเกลียวอัดแรง ( $f_{pu}$ ) ขนาด และปริมาณเหล็กเสริม ลวดเกลียวอัดแรง และขนาดของหน้าตัดคาน ผลการทดสอบทางสถิติแสดงให้เห็นว่าฮิลไคลมิงอัลกอริทึมออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบต้นได้ประหยัดกว่าวิธีคำนวณแบบดั้งเดิมร้อยละ 11.17

## คำสำคัญ

การออกแบบที่เหมาะสม, ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม, คอนกรีตอัดแรง, คานสะพานแบบต้น, ชิ้นส่วนสำเร็จรูป

## Abstract

This research presents an application of a hill climbing algorithm for optimum design of prestressed concrete plank girders in order to determine the design parameters based on the Engineering Institute of Thailand standard, E.I.T. 1009-34, 2553 by strength design method for trucks HS20 - 44 according to AASHTO LRFD 1992 standards. The algorithm was developed using Microsoft Visual Basic 6.0 and it was tested with 3 frequently-used examples. The examples are single-span with the simply supported varied by length of girders. The objective function is to find the lowest price. The design variable consists of the strength of concrete ( $f_c'$ ) Yield strength of reinforcement steel ( $f_y$ ) Ultimate strength of prestressing strand ( $f_{pu}$ ) Sizes and quantities of reinforcing steel, Prestressing strand and the cross-sectional area of plank girder. The statistical analysis revealed that the design of prestressed concrete plank girders by the hill climbing algorithm gave 11.17 % cheaper than when applying traditional methods.

## Keywords

optimum design; hill climbing algorithm; prestressed concrete; plank girder; precast component

## 1. คำนำ

การพัฒนาสะพานคอนกรีตอัดแรงได้เริ่มขึ้นในยุโรปภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 [1] ในปี ค.ศ. 1950 ในยุคนั้นการสร้างสะพานเหล็กเริ่มลดลง ขณะที่การสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 78 และเป็นที่นิยมมากขึ้นในประเทศต่าง ๆ เนื่องจากสะพานชนิดนี้สามารถควบคุมการแตกร้าวและการโก่งตัว หรือแอ่นตัวได้ดี ก่อสร้างได้รวดเร็วในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ และโครงสร้างสวยงาม ในประเทศไทยมีการใช้สะพานคอนกรีตอัดแรงมากขึ้นเป็นลำดับ นับแต่ปี พ.ศ. ๒๕๖๒ โดยสะพานช่วงพาดน้อยกว่า  $25 \pm 5$  เมตร มักใช้ระบบคานคอนกรีตอัดแรงชนิดดัดล่วงหน้า กระบวนการก่อสร้างคานสะพานคอนกรีตอัดแรงมีสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการผลิตชิ้นส่วนของคานด้วยระบบหล่อสำเร็จรูปแบบดัดล่วงหน้าอัดแรงก่อน (Precast / Prestressed concrete) โดยขนาดคานกว้างไม่เกิน 1.00 เมตร ส่วนความยาวตามแบบที่ระบุ หากแท่นหล่อมีความยาวมากก็จะผลิตได้รอบละหลายคาน ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการติดตั้งคานที่หน้างาน โดยใส่เหล็กเสริมธรรมดา (Ordinary reinforcement) สานติดกับเหล็กดัดที่โผล่จากหลังคาน แล้วเทคอนกรีตทับหน้าหล่อในที่ ให้เป็นเสมือนคานตัวเดียวกัน (Monolithic) เรียกหน้าตัดคานเชิงประกอบ (Composite section) การออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงในขั้นตอนแรก เดิมผู้ออกแบบต้องอาศัยประสบการณ์ และความชำนาญ เช่น ประมาณค่าความลึกของคานแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยประมาณจากอัตราส่วนของช่วงความยาวพาด  $L/15$  ถึง  $L/25$  [2] ซึ่งสามารถหาหน้าตัดที่รับแรงที่เกิดขึ้นได้ แต่ไม่ได้เน้นถึงความประหยัด แตกต่างจากการใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ที่สามารถหาค่าการออกแบบที่เหมาะสมได้ดีกว่า

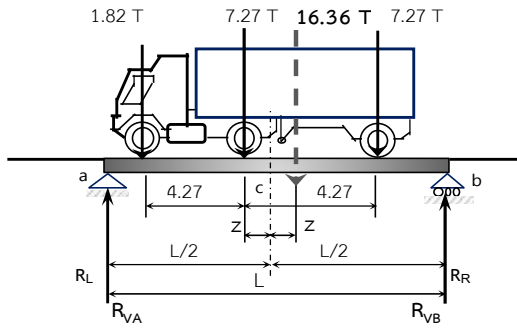
ปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) มาประยุกต์ใช้ในออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากสามารถทำงานได้อัตโนมัติ มีความรวดเร็วและให้ประสิทธิภาพที่ดี เพราะอัลกอริทึม (Algorithm) เหล่านั้นสามารถช่วยค้นหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการคำนวณออกแบบได้อย่างถูกต้องปลอดภัยตามข้อกำหนด และมีความประหยัดเหมาะสม อาทิ Akin และคณะ [3] ใช้อัลกอริทึมฮาร์โมนีเซอร์ซ (HS) เพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต

เสริมเหล็ก และ Aga และคณะ [4] ทดสอบใช้อัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ออกแบบโครงข้อแข็งของคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วน Tapown และคณะ [5] ได้นำเอาอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (ABC) มาใช้ออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก และ Limkamontip และคณะ [6] ประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (GA) ออกแบบหาค่าที่เหมาะสมของคานสะพานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปตัวไอ (I-Section) และ Banleupuech และคณะ [7] ใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (PSO) ออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานสะพานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องกลาง (Box Girder Bridge) และ Esfandiari และคณะ [8] ใช้อัลกอริทึมฝูงอนุภาคผสมวิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (DMPSO) ออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กและท้ายสุด Tapown และคณะ [9] ใช้ฮิลคลimbingอัลกอริทึม HCA มาใช้ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่ยังไม่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบตัน

งานวิจัยนี้จึงพัฒนา และทดสอบฮิลคลimbingอัลกอริทึม (Hill climbing algorithm; HCA) มาใช้ออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม โดยสร้างโปรแกรมออกแบบด้วยไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก 6.0 เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมในการออกแบบ ที่มีขั้นตอนทำงานไม่ซับซ้อน และมีความง่ายในการพัฒนา ซึ่งได้นำมาเปรียบเทียบกับวิธีคำนวณแบบดั้งเดิม (Traditional Method; TM)

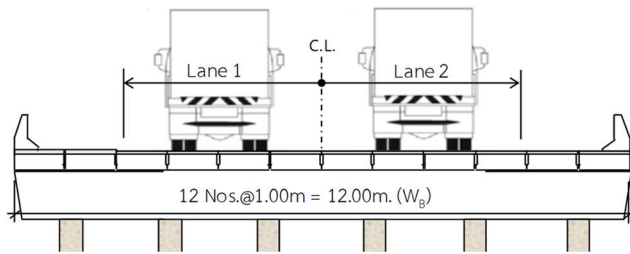
## 2. การออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรง

2.1 น้ำหนักบรรทุกจรของรถบรรทุกแบบ HS20-44 [10] ตำแหน่งของรถบรรทุกที่ถ่วงน้ำหนักลงบนคานสะพานทำให้เกิดโมเมนต์ดัดมากที่สุด และคำนวณหาระยะของแรงลัพธ์ตามทฤษฎีของ Varignon (กลศาสตร์วิศวกรรม) ระยะ Z เท่ากับ 1.07 1.07 และ 0.71 เมตร สำหรับช่วงพาด 8.0 10.0 และ 12.0 เมตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 1) ใช้แรงลัพธ์ 14.54 T สำหรับช่วงพาด 8.0 และ 10.0 เมตร



รูปที่ 1 ตำแหน่งของรถบรรทุกบนสะพานที่ให้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด

2.1.1 การกระจายน้ำหนักบรรทุกของล้อ [10] (Wheel load distribution) ใช้สองช่องจราจร ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สะพานแบบสองช่องจราจรที่ใช้วิเคราะห์

คำนวณค่าตัวประกอบพารามิเตอร์ ในการออกแบบคานสะพาน (สมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ)

$$C = \frac{K \cdot W_B}{L} < 5.0 \quad (1)$$

$$D = 0.305 \cdot (5.75 - 0.5 \cdot N_L) + 0.7 \cdot N_L \cdot (1 - 0.2 \cdot C)^2 \quad (2)$$

โดยที่  $S$  มีค่าเท่ากับ 1.0 เมตร  $K$  เท่ากับ 0.7 สำหรับคานแบบตัน  $W_B$  คือ ความกว้างสะพานเท่ากับ 12.0 เมตร  $L$  คือ ความยาวของคาน และ  $N_L$  คือ จำนวนของช่องจราจร

คำนวณสัดส่วนของน้ำหนักล้อ (Wheel Load Fraction, WLF) บนคานหลักของแต่ละตัว ที่คูณกับค่าโมเมนต์ และแรงเฉือนในช่องจราจร (สมการที่ 3)

$$WLF = \frac{S}{D} \quad (3)$$

คำนวณตัวประกอบของน้ำหนักกระทก (Impacted load)

$$IM = \frac{15.24}{L + 38} \leq 0.30 \quad (4)$$

2.2 คำนวนการโก่งตัวของคานสะพานคอนกรีตอัดแรง [10] การลดแรงอัดเนื่องจากการคืบของคอนกรีต และการหดตัว การคลายแรงดึงในเส้นลวด การเสื่อมลดของแรงดังก่อรวมทั้ง การเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีผลทำให้การโก่งตัวของคานเพิ่มมากขึ้น ค่าตัวคูณประกอบการโก่งหรือแอ่นตัว สำหรับหน้าตัดคานเป็นแบบคานปกติ และคานเชิงประกอบ (ตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ)

ตารางที่ 1 ค่าตัวคูณประกอบการโก่งตัวในสภาวะขณะถ่ายแรง ตามมาตรฐาน AASHTO [10]

| ขณะถ่ายแรง                           | คานปกติ | คานเชิงประกอบ |
|--------------------------------------|---------|---------------|
| โก่งตัวลงเนื่องจากน้ำหนักตัวคาน      | 1.85    | 1.85          |
| โก่งตัวขึ้นเนื่องจากอัดแรงขณะติดตั้ง | 1.80    | 1.80          |

ตารางที่ 2 ค่าตัวคูณประกอบการโก่งตัว ในสภาวะใช้งานในระยะยาว ตามมาตรฐาน AASHTO [10]

| ขณะใช้งานในระยะยาว                   | คานปกติ | คานเชิงประกอบ |
|--------------------------------------|---------|---------------|
| โก่งตัวลงเนื่องจากน้ำหนักตัวคาน      | 2.70    | 2.40          |
| โก่งตัวขึ้นเนื่องจากอัดแรง           | 2.45    | 2.20          |
| โก่งตัวลงเนื่องจากน้ำหนักเทตบหน้า    | -       | 2.30          |
| โก่งตัวลงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่ม | 3.00    | 3.00          |

2.2.1 การควบคุมระยะโก่งหรือแอ่นตัวของคาน (Deflection limitation) สูงสุดไม่เกินกว่าข้อกำหนดของ AASHTO สำหรับการออกแบบคานสะพาน โดยพิจารณาของรถบรรทุกแบบ HS20-44 (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ค่าพิกัดการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐาน [10]

| ประเภทของชิ้นส่วน               | การโก่งตัวที่พิจารณา         | พิกัดการโก่งตัว     |                  |
|---------------------------------|------------------------------|---------------------|------------------|
|                                 |                              | สะพานที่ไม่มีคนเดิน | สะพานที่มีคนเดิน |
| คานช่วงพาดเดียวหรือคานต่อเนื่อง | น้ำหนักบรรทุกจรวมกับแรงกระทก | L/800               | L/1000           |

2.3 โมเมนต์ดัดประลัย ใช้น้ำหนักบรรทุกกลุ่ม 1 ตามมาตรฐานของ AASHTO [10] (สมการที่ 5)

$$M_u = 1.3 \cdot (M_D + 1.67 M_{L+IM}) \quad (5)$$

โดยที่  $M_D$  คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกตายตัว  
 $M_{L+IM}$  คือ รวมผลของโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของ  
 รถบรรทุกในช่องจราจร และแรงกระแทก

การตรวจสอบโมเมนต์ดัดระบุ และค่าโมเมนต์ดัดประลัย  
 (สมการที่ 6)

$$M_u \leq \phi \cdot M_n \quad (6)$$

โดยที่ โมเมนต์ดัดระบุคำนวณได้ (สมการที่ 7)

$$\phi M_n = \phi \cdot A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot d_p \cdot \left[ 1 - 0.59 \cdot \rho_p \cdot \frac{f_{ps}}{f_c'} \right] \quad (7)$$

2.4 แรงเฉือนประลัย (Ultimate shear strength) จาก  
 น้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มค่า [10] (สมการที่ 8)

$$V_u = 1.3 \cdot (V_D + 1.67 V_{L+IM}) \quad (8)$$

โดยที่  $V_D$  คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกตายตัว  
 $V_{L+IM}$  คือ รวมผลของแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักของ  
 รถบรรทุกในช่องจราจร และแรงกระแทก

2.4.1 กำลังต้านแรงเฉือนของคอนกรีต  $V_c$  ใช้ค่าน้อย  
 กว่าระหว่าง  $V_{ci}$  และ  $V_{cw}$  (สมการที่ 9 และ 10ตามลำดับ)  
 [11]

$$V_{ci} = 0.16 \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d_p + V_D + \frac{V_i \cdot M_{cr}}{M_{max}} \quad (9)$$

แต่ค่า  $V_{ci}$  ต้องใช้ค่าไม่น้อยกว่า  $0.45 \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d_p$

$$V_{cw} = (0.93 \sqrt{f_c'} + 0.3 f_{pc}) \cdot b \cdot d_p - V_p \quad (10)$$

โดยที่  $M_{cr}$  คือโมเมนต์ดัดแตกกร้าว  $M_{max}$  คือ ค่า  
 โมเมนต์สูงสุด  $f_{pc}$  คือ หน่วยแรงอัดในคอนกรีต เนื่องจาก  
 แรงอัดประสิทธิผล และน้ำหนักบรรทุกภายนอกจริง โดย  
 คำนวณถึงจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัด  $V_p$  คือ แรงเฉือนเนื่องจาก  
 แรงดึงประสิทธิผลของการเสริมลวดเกลียวอัดแรงที่หน้าตัดที่  
 พิจารณา  $s$  คือ พิจารณาเหล็กปลอกในช่วง 1.0 เมตร และ  
 $s_{max} = 4 \cdot b \leq 60cm$ .

2.5 ข้อกำหนดของ วสท. 1009-34 [11] ตามมาตรฐาน  
 สำหรับการออกแบบอาคารคอนกรีตอัดแรง ดังนี้

2.5.1 ผลรวมของแรงเสีอมลดของแรงอัดชนิดแบบดึงลวด  
 ก่อน (Prestressed Loss) คำนวณจากนี้

$$\Delta f_s = ES + CR + SH + RE \quad (11)$$

โดยที่  $\Delta f_s$  คือ ผลรวมการเสีอมลดของแรงอัดแบบดึง  
 ลวดก่อน  $ES$  คือ แรงเสีอมลดเนื่องจากการหดตัวแบบอีลา  
 สติก  $CR$  คือ แรงเสีอมลดเนื่องจากการคืบของคอนกรีต  $SH$   
 คือ แรงเสีอมลดเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต และ  $RE$   
 คือ แรงเสีอมลดเนื่องจากการคลายแรงดึงของลวดเหล็กอัดแรง

2.5.2 ลวดเกลียวอัดแรงสำหรับงานคอนกรีตอัดแรง ใช้  
 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (Thai industrial  
 standard) มอก. 420-2540\* (ใช้ฉบับล่าสุด) ลวดเกลียวชนิด  
 7 เส้นโดยลวด 6 เส้นพันรอบเส้นที่ 7 ประเภทคลายแรงต่ำ  
 (Low relaxation) (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงตามมาตรฐานมอก.420-  
 2540

| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง<br>(mm) | กำลังดึงประลัย<br>(kg) | พื้นที่หน้าตัดประสิทธิผล<br>(mm <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|
| เกรด 1860 (270K)              |                        |                                                |
| 11.11                         | 14070                  | 74.2                                           |
| 12.7                          | 18765                  | 98.7                                           |

2.6 ค่าที่แปรเปลี่ยนตามกำลังของคอนกรีต  $\beta_1$  โดย  
 กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่า  
 หรือเท่ากับ 300 ksc หากกำลังของคอนกรีตมีค่าสูงกวานั้นให้  
 ลดค่า  $\beta_1$  ลง 0.008 ทุก ๆ กำลังอัดคอนกรีตที่สูงขึ้น 10 ksc  
 (สมการที่ 12)

$$\beta_1 = 0.85 - 0.008 \cdot \left( \frac{f_c' - 300}{10} \right) \geq 0.65 \text{ เมื่อ } f_c' > 300 \quad (12)$$

โดยที่  $f_c'$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่ออายุ 28  
 วัน ของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน

เพื่อให้คานเป็นแบบการเสริมลวดเกลียวอัดแรงน้อยกว่าสมดุ (Under reinforcement) ให้ใช้ค่าดัชนีการเสริม  $\omega_p$  (สมการที่ 13)

$$\omega_p \leq 0.36 \cdot \beta_1 \quad (13)$$

ในกรณีที่เสริมเฉพาะลวดเกลียวอัดแรง (pre stressed steel) จะคำนวณหน่วยแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงที่สภาวะวิบัติ (สมการที่ 14)

$$f_{ps} = f_{pu} \left[ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left( \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_{c'}} \right) \right] \quad (14)$$

$\gamma_p$  คือ ค่าตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังครากของลวดเกลียวอัดแรง มีค่า คือ 0.28 เมื่อ  $\frac{f_{py}}{f_{pu}} \geq 0.90$

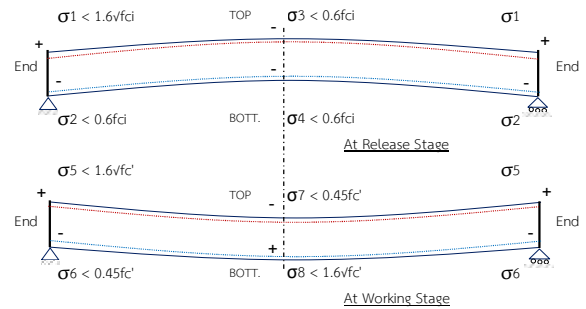
กำหนดให้  $f_{py}$  คือ กำลังครากของลวดเกลียวอัดแรง  $f_{pu}$  คือ กำลังดึงประลัยของลวดเกลียวอัดแรง  $f_{ps}$  คือ หน่วยแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงที่สภาวะวิบัติ  $f_{se}$  คือ หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของลวดเกลียวอัดแรง  $f_y$  คือ กำลังครากของเหล็กเสริมธรรมดา  $A_{ps}$  คือ เนื้อที่หน้าตัดของลวดเกลียวอัดแรง  $d_p$  คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงจุดศูนย์กลางของลวดเกลียวอัดแรง และ  $\rho_p$  คือ อัตราส่วนของลวดเกลียวอัดแรง  $\frac{A_{ps}}{b \cdot d_p}$  หรือ  $\frac{\omega_p \cdot f_{c'}}{f_{ps}}$

2.7 พิกัดหน่วยแรงในคอนกรีตภายใต้สถานะสิ้นสุดการใช้งาน (Stress Limitations) หน่วยแรงชั่วคราวในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงมาจากลวดเกลียวอัดแรงก่อน ซึ่งจะต้องไม่เกินกำหนด (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 หน่วยแรงปลอดภัยในคอนกรีตขณะถ่ายแรงตามมาตรฐาน ACI code และ วสท.[11]

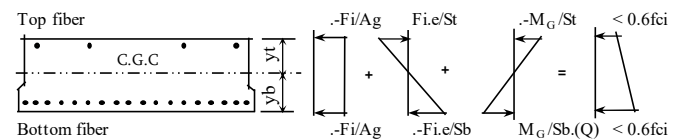
| หน่วยแรงปลอดภัยในคอนกรีต             |                      |
|--------------------------------------|----------------------|
| 1.1 หน่วยแรงอัดในองค์อาคาร           | หน่วยแรง (ksc)       |
| สำหรับหน่วยแรงอัดเริ่มแรก            | 0.80 $f_{c'}$        |
| หน่วยแรงอัดเทียบกับเป็นรูปสามเหลี่ยม | 0.60 $f_{ci}$        |
| 1.2 หน่วยแรงดึงในองค์อาคาร           |                      |
| ไม่มีเหล็กเสริมธรรมด้ายึดเหนี่ยว     | $0.80(f_{ci})^{0.5}$ |
| ที่ปลายคานผิวบนขององค์อาคาร          | $1.60(f_{ci})^{0.5}$ |

2.7.1 การคำนวณหน่วยแรงจากการส่งถ่ายแรงของลวดเกลียวอัดแรงสู่หน้าตัดคานคอนกรีต [12] ด้วยตำแหน่งของลวดเหล็กอัดแรงที่เยื้องศูนย์ ทำให้คานมีพฤติกรรมยกตัวขึ้นในสภาวะขณะถ่ายแรง และในสภาวะขณะใช้งานคานมีพฤติกรรมโก่งตัวลง ตามข้อกำหนดของการออกแบบที่เสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุ (Under reinforcement) โดยกำหนดให้เครื่องหมายบวก (+) และลบ (-) แทนหน่วยแรงดึง และแรงอัดตามลำดับ (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 หน่วยแรงในคอนกรีตของหน้าตัดคานที่ใช้วิเคราะห์

2.7.2 การคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่สภาวะถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคาร (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 หน่วยแรงในหน้าตัดคาน สภาวะขณะถ่ายแรง

หน่วยแรงที่ปลายคานผิวบน

$$\sigma_1 = \left[ \frac{-Fi}{AG} \right] + \left[ \frac{Fi \cdot e}{S_t} \right] \leq 1.6 \sqrt{f_{ci}} \quad (15)$$

หน่วยแรงที่ปลายคานผิวล่าง

$$\sigma_2 = \left[ \frac{-Fi}{AG} \right] - \left[ \frac{Fi \cdot e}{S_b} \right] \leq 0.6 \cdot f_{ci} \quad (16)$$

หน่วยแรงที่กึ่งกลางคานผิวบน

$$\sigma_3 = \left[ \frac{-Fi}{AG} \right] + \left[ \frac{Fi \cdot e}{S_t} \right] - \left[ \frac{MG}{S_t} \right] \leq 0.6 \cdot f_{ci} \quad (17)$$

หน่วยแรงที่กึ่งกลางคานผิวล่าง

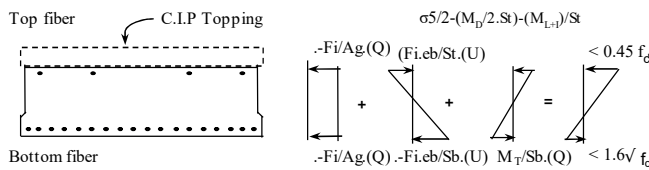
$$\sigma_4 = \left[ \frac{-Fi}{AG} - \frac{Fi \cdot e}{S_b} \right] + \left[ \frac{MG}{S_b} \cdot Q \right] \leq 0.6 \cdot f_{ci} \quad (18)$$

2.7.3 หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ งาน (หลังการเสื่อมลดทั้งหมดของแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรง) จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนด (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 หน่วยแรงปลอดภัยในคอนกรีตขณะใช้งาน ตามมาตรฐาน ACI code และ วสท.[11]

| หน่วยแรงปลอดภัยในคอนกรีต                 | หน่วยแรง (ksc)     |
|------------------------------------------|--------------------|
| กำหนดให้คอนกรีตมีอายุครบ 28 วัน          |                    |
| หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงอัด       | $0.45 f_c'$        |
| หน่วยแรงดึงในบริเวณที่เคยถูกอัดแรงมาก่อน | $1.60(f_c')^{0.5}$ |

2.7.4 การคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่สภาวะการใช้งาน (รูปที่ 5) [12]



รูปที่ 5 หน่วยแรงในหน้าตัดคาน สภาวะขณะใช้งาน

หน่วยแรงที่ปลายคานผิวบน

$$\sigma_5 = \left[ \frac{-F_i}{A_G} \cdot Q \right] + \left[ \frac{F_i \cdot e}{S_t} \cdot U \right] \leq 1.6 \sqrt{f_c'} \quad (19)$$

หน่วยแรงที่ปลายคานผิวล่าง

$$\sigma_6 = \left[ \frac{-F_i}{A_G} \cdot Q \right] + \left[ \frac{F_i \cdot e}{S_b} \cdot U \right] \leq 0.45 \cdot f_c' \quad (20)$$

หน่วยแรงที่กึ่งกลางคานผิวบน

$$\sigma_7 = \frac{\sigma_5}{2} - \left[ \frac{M_D}{2 \cdot S_t} \right] - \left[ \frac{M_L + IM}{S_t} \right] \leq 0.45 \cdot f_c' \quad (21)$$

หน่วยแรงที่กึ่งกลางคานผิวล่าง

$$\sigma_8 = \left[ \frac{-F_i}{A_G} - \frac{F_i \cdot e}{S_b} \right] + \left[ \frac{M_T}{S_b} \cdot Q \right] \leq 1.6 \sqrt{f_c'} \quad (22)$$

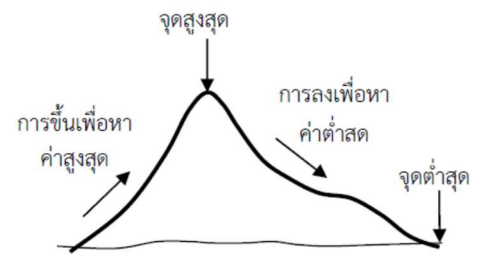
โดยที่  $F_i$  คือ หน่วยแรงอัดที่ถ่ายเข้าสู่คานแรกเริ่ม  $F_e$  คือ หน่วยแรงอัดประสิทธิภาพขณะใช้งาน  $f_{ci}$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตในขณะถ่ายแรง  $A_G$  คือ เนื้อที่ทั้งหมดของหน้าตัดคาน  $M_G$  คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักของคาน  $M_T$  คือ

ผลการรวมโมเมนต์ทั้งหมด  $I_G$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน  $e$  คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคอนกรีตถึงกลุ่มของลวดเกลียวอัดแรง  $S_t$  คือ โมดูลัสของหน้าตัดคานจากจุดศูนย์กลางคานถึงผิวบนของคาน  $S_b$  คือ โมดูลัสของหน้าตัดคานจากจุดศูนย์กลางคานถึงผิวล่างของคาน  $Q$  คือ ตัวคูณลดกำลังของหน่วยแรง  $\frac{F_e}{F_i}$  และ  $U$  คือ ตัวคูณลดกำลังของโมดูลัสหน้าตัดคาน  $\frac{S_t}{S_b}$

### 3. อัลกอริทึมฮิลล์คลimbing

ในปี ค.ศ.1984 อัลกอริทึมฮิลล์คลimbing (Hill Climbing Algorithm, HCA) Pearl [13] ได้นำเสนอครั้งแรกเป็นการค้นหาคำตอบที่เหมือนป็นเขา โดยนักปีนเขาจะเดินทางไปสู่อยอดเขาได้จะต้องมองหาตำแหน่งยอดเขา แล้วไปให้ถึงจุดนั้นโดยหาเส้นทางที่สั้นที่สุด เพื่อใช้เวลาให้น้อยลง

โดยอัลกอริทึมนี้เป็นวิธีการหาสถานะเป้าหมายหรือสถานะคำตอบที่ดีที่สุด ที่หาคำตอบเชิงฮิวริสติก (Heuristic Search) ซึ่งกำลังนิยมใช้ในการแก้ปัญหาในด้านความเหมาะสมหลาย ๆ ปัญหา เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับค่าสูงสุดหรือต่ำสุดหาคำตอบเชิงกราฟ (Graph Search Algorithm) [8] คล้ายการไต่ขึ้นเขา และลงจากเขาในแนวตั้งตลอด ในการมุ่งสู่เป้าหมาย (รูปที่ 6) ซึ่งขึ้นอยู่กับสมการเป้าหมาย และการสุ่มค่าที่อยู่ในช่วงที่กำหนด โดยลักษณะการทำงาน ดังนี้



รูปที่ 6 การปีนเขาข้อมูลของวิธีแบบจำลองการปีนเขา

1. การสร้างสถานะเริ่มต้น เป็นการสร้างสถานะคำตอบแรกขึ้นด้วยการสุ่มตัวแปรออกแบบของปัญหาที่กำหนดไว้ เพื่อเข้าสู่กระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสม

2. การสร้างสถานะใหม่ เป็นการสร้างคำตอบใหม่ด้วยการปรับเปลี่ยนจากคำตอบเดิมเล็กน้อย ซึ่งปัญหานี้ คือ การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของ กำลังคอนกรีต จุดครากของเหล็กเสริม ความลึกคาน ขนาด และปริมาณลวดเกลียวอัดแรง โดยสุมขึ้นหนึ่งชั้นหรือสุมลดหนึ่งชั้น ในบางตำแหน่ง (รูปที่ 7) ซึ่งคำตอบใหม่ที่ได้สามารถเป็นไปได้ทั้งคำตอบที่ดีขึ้นหรือแย่ลงกว่าคำตอบเดิม

3. ตรวจสอบสถานะ หลังจากการสร้างสถานะเพื่อตรวจสอบ และแสดงสถานะของคำตอบที่สร้างขึ้น

4. สถานะเป้าหมาย เป็นสถานะที่ถูกกำหนดขึ้นตามที่ต้องการหรือสถานะสุดท้ายที่คำตอบเป็นไปตามสมการเป้าหมาย หรือเข้าสู่เงื่อนไขการหยุด

|    | fc' | fy   | H  | Strand | QTY. |   | fc' | fy   | H  | Strand | QTY. |
|----|-----|------|----|--------|------|---|-----|------|----|--------|------|
| -1 | 400 | 3000 | 30 | 11.1   | 10   | → | 450 | 3000 | 25 | 11.1   | 8    |
| 0  | 450 | 3000 | 35 | 11.1   | 12   |   | 500 | 3000 | 30 | 12.7   | 10   |
| +1 | 500 | 4000 | 40 | 12.7   | 14   |   | 550 | 4000 | 35 | 12.7   | 12   |

ก) คำตอบเดิม

ข) คำตอบใหม่

รูปที่ 7 ลักษณะการปรับคำตอบของวิธีแบบจำลองการป็นเขา

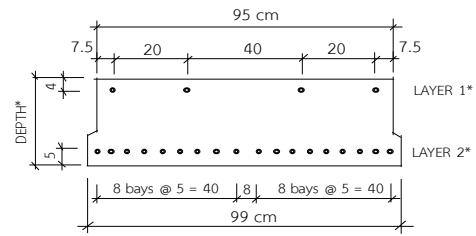
## 4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 4.1 ขอบเขตการทำงาน

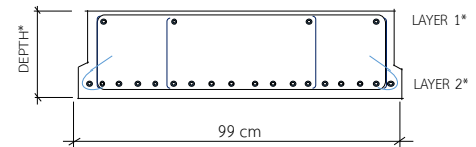
โปรแกรมที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ได้ถูกพัฒนาด้วย ไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก 6.0 และทดสอบบนวินโดว 7 ในเครื่องที่ใช้ CPU i7 (ตารางที่ 7) ขอบเขตการทำงานของโปรแกรม กำหนดความลึกสูงสุด ( $h_{max}$ ) 180 cm และปรับลด ค่าครวละ 2 cm จนถึงความลึกต่ำสุด ( $h_{min}$ ) 20 cm ตำแหน่งของลวดเกลียวอัดแรง และการเสริมเหล็กในหน้าตัดคาน (รูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ) และทุกตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 7 ขอบเขตการใช้งานของโปรแกรม

| ตัวแปรออกแบบ         | ต่ำสุด | สูงสุด | หน่วย |
|----------------------|--------|--------|-------|
| กำลังอัดคอนกรีต      | 450    | 550    | ksc   |
| ขนาดลวดเกลียวอัดแรง  | 11.1   | 12.7   | mm    |
| จำนวนลวดเกลียวอัดแรง | 2      | 30     | Nos   |
| ความลึกของคาน (h)    | 20     | 180    | cm    |
| ขนาดเหล็กกล้า SD30   | 12     | 16     | mm    |



รูปที่ 8 ตำแหน่งของลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้วิเคราะห์



รูปที่ 9 ลักษณะการเสริมเหล็กในหน้าตัดคาน

งานวิจัยนี้กำหนดใช้ราคาวัสดุคอนกรีตผสมเสร็จ ราคาเหล็กเสริมของพาณิชย์จังหวัดมหาสารคามประจำเดือนกันยายน ปี พ.ศ. 2560 ใช้ค่าแรงงานจากบัญชีค่าแรง และค่าดำเนินการสำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้าง ฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2559 [14] (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 ราคาวัสดุและค่าแรงงาน (ไม่รวมงานไม้แบบและคอนกรีตเททับหน้า)

| คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอก) |           |           |                      |
|-----------------------------|-----------|-----------|----------------------|
| กำลังอัด fc' (ksc.)         | ราคาวัสดุ | ค่าแรงงาน | หน่วย                |
| 450                         | 2,350.00  | 330.00    | Baht /m <sup>3</sup> |
| 500                         | 2,470.00  | 330.00    | Baht /m <sup>3</sup> |
| 550                         | 2,620.00  | 330.00    | Baht /m <sup>3</sup> |
| ราคาเหล็กเสริมและค่าแรง     |           |           |                      |
| เหล็กปลอก SD30              | 23.00     | 2.00      | Baht /kg             |
| ลวดเกลียวอัดแรง 1860        | 32.00     | 8.00      | Baht /kg             |

### 4.2 สมการเป้าหมาย

การออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรง ที่มีรูปหน้าตัดที่เหมาะสม และราคาต่ำสุด โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดสมการที่เป็นสมการเป้าหมายรวมราคาวัสดุ และค่าแรงงาน (สมการที่ 4.1)

$$F = \text{Min} \Sigma \cdot (V_C \cdot C_C + W_T \cdot C_T + W_S \cdot C_S) \quad (4.1)$$

กำหนดให้

$F$  คือ ราคารวมของคานสะพานคอนกรีตอัดแรง

$V_C$  คือ ปริมาตรของคอนกรีต

$C_C$  คือ ราคาของคอนกรีต

$W_T$  คือ น้ำหนักรวมของลวดเกลียวอัดแรง

$C_T$  คือ ราคาของลวดเกลียวอัดแรง

$W_S$  คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริมธรรมดา

$C_S$  คือ ราคาของเหล็กเสริมธรรมดา

#### 4.3 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม

ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม (รูปที่ 10) ทำงานโดยโปรแกรมจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดให้ แล้วนำค่ามาประมวลผลหาค่าตัวแปรที่ต้องการในงานออกแบบ ดังนี้

1. เลือกช่วงความยาวตามตัวอย่างทดสอบสามตัวอย่างทดสอบ

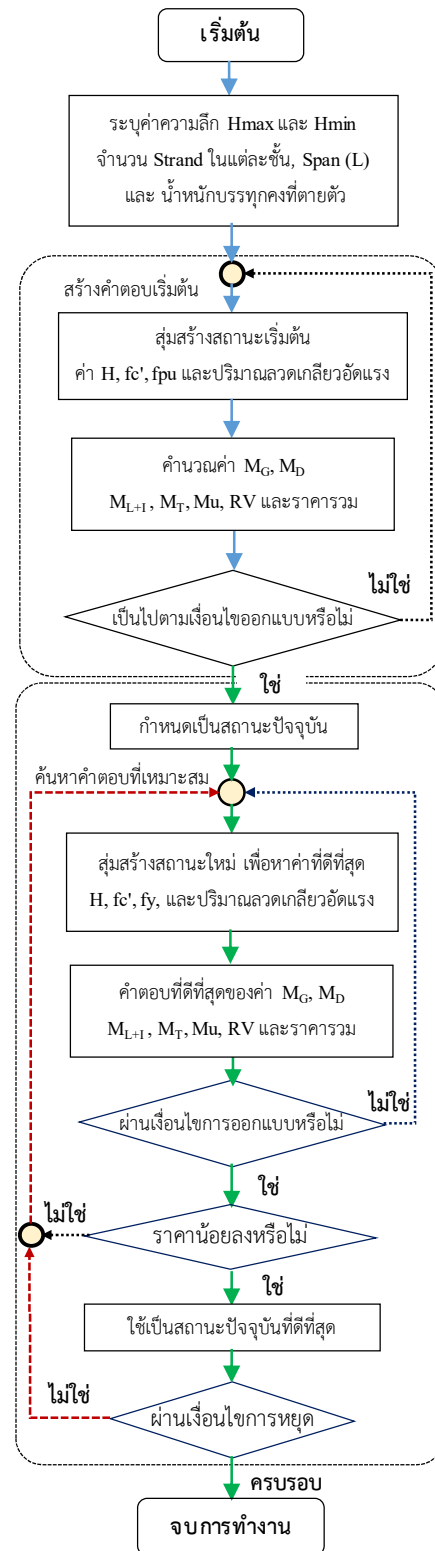
2. กำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ตายตัวที่กระทำต่อคาน ไม่นำน้ำหนักคานในเบื้องต้น

3. สร้างคำตอบเริ่มต้น กำหนดความลึกมากที่สุด และน้อยสุดของคาน จำนวนลวดเหล็กอัดแรง กำลังคอนกรีต โดยขั้นตอนนี้จะทำการสุ่มตัวแปรออกแบบทั้งหมด จากนั้นตรวจสอบกับเงื่อนไขตามข้อกำหนด และจะนำผลการออกแบบนี้กำหนดเป็นคำตอบของสถานะปัจจุบัน

4. การสุ่มสร้างสถานะใหม่ เป็นขั้นตอนการสุ่มปรับจากคำตอบเดิมเล็กน้อย เพื่อให้ได้สถานะคำตอบใหม่ที่ดีกว่า ซึ่งจะรวมถึงการปรับคุณสมบัติของหน้าตัดคาน จำนวนลวดเกลียวอัดแรง กำลังคอนกรีต เหล็กเสริม โดยสุ่มขึ้นหนึ่งขั้น และสุ่มลดลงหนึ่งขั้น ผ่านขั้นตอนคำนวณทั้งหมดตามที่กำหนดไว้ และได้ราคา แล้วจึงตรวจสอบกับเงื่อนไขออกแบบ

5. ตรวจสอบราคาประหยัดกว่าขั้นตอนที่ผ่านมา และผลรวมคำตอบใหม่น้อยลงกว่าคำตอบเดิม หรือไม่ โดยเทียบกับสมการที่ (4.1) มาใช้ในการพิจารณาผลของคำตอบ คำตอบใหม่จะแทนคำตอบเดิม แล้วสถานะคำตอบใหม่นี้จะถูกกำหนดเป็นสถานะปัจจุบัน

6. เงื่อนไขการหยุดทำงานของโปรแกรมจะประกอบด้วยสองเงื่อนไข คือคำตอบที่เหมาะสม และจำนวนรอบการทำงานตามที่กำหนด



รูปที่ 10 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม HCA

#### 5. ตัวอย่าง และผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ทดสอบกับสามตัวอย่าง โดยออกแบบคานตัวในเท่านั้น (ตารางที่ 9) ซึ่งสะพานกว้าง 12.0 เมตร ใช้สองช่อง

จราจรรับน้ำหนักบรรทุกทุกชนิด HS20-44 สำหรับอัลกอริทึม HCA กำหนดรอบทำงานสูงสุด 1,800 รอบ โดยใช้กำลังอัดของคอนกรีต ความลึกของคาน ขนาด และจำนวนลวดเกลียวอัดแรง จัดให้มีตำแหน่งตามที่กำหนดในแต่ละชั้น และขนาดเหล็กดัด ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ของการออกแบบด้วยอัลกอริทึม HCA จะใช้การนับจำนวนรอบแทนการจับเวลา เนื่องจากไม่ขึ้นกับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมอื่นที่อาจทำงานอยู่เบื้องหลังระบบปฏิบัติการ ซึ่งทั้งสองวิธี TM และ HCA ยังใช้ข้อกำหนด และเงื่อนไขในการออกแบบเหมือนกัน เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักได้ปลอดภัย และมีราคาค่าก่อสร้างรวมที่ประหยัดที่สุด

ตารางที่ 9 ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

| ตัวอย่างทดสอบ | น้ำหนักบรรทุกคงที่ตายตัว $W_{im}$ (kg/m) | ความยาวช่วงพาด $L$ (m) |
|---------------|------------------------------------------|------------------------|
| 1             | 900                                      | 8.0                    |
| 2             | 900                                      | 10.0                   |
| 3             | 900                                      | 12.0                   |

### 5.1 ตัวอย่างทดสอบที่ 1

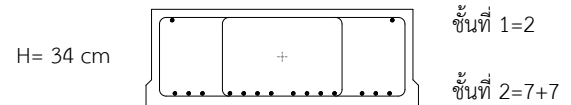
ตารางที่ 10 แสดงข้อมูลผลการออกแบบที่เหมาะสม โดย TM และ HCA ได้ออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม โดยจากผลการเปรียบเทียบราคา TM มีความสิ้นเปลืองกว่า HCA ซึ่งมีราคา รวม 1,930.32 1,714.69 บาทต่อเมตร ตามลำดับ และราคาความต่างร้อยละ 11.17

ตารางที่ 10 ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ TM และ HCA ตัวอย่างทดสอบที่ 1

| วิธีที่ใช้คำนวณ                                                      | TM             | HCA            |
|----------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| $f_c'$ (ksc)                                                         | 500            | 500            |
| $f_y$ (ksc)                                                          | 3,000          | 3,000          |
| $f_{pu}$ (ksc)                                                       | 18,600         | 18,600         |
| ขนาดความลึก $H$ (cm)                                                 | 34             | 32             |
| โมเมนต์ดัดประลัย $M_u$ (kg-m)                                        | 43,070         | 42,760         |
| กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด $M_n$ (kg-m)                                  | 59,900         | 53,520         |
| แรงเฉือนประลัย $V_u$ (kg)                                            | 23,920         | 23,680         |
| กำลังต้านทานแรงเฉือน $V_n$ (kg)                                      | 37,420         | 35,640         |
| ตรวจสอบการโก่งหรือแอ่นตัว ( $\delta \leq 10$ mm) ขณะใช้งาน เนื่องจาก |                |                |
| น้ำหนักจรของรถบรรทุก ( $L/800$ )                                     | -0.20          | -9.20          |
| น้ำหนักบรรทุกคงที่ในระยะยาว                                          | +6.60          | +6.60          |
| จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 1                                        | 2- $\phi 12.7$ | 2- $\phi 12.7$ |

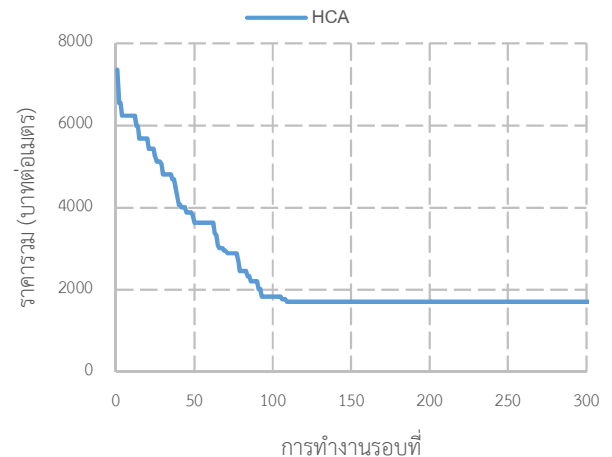
|                               |                 |                 |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 2 | 14- $\phi 12.7$ | 12- $\phi 12.7$ |
| เหล็กดัดตั้ง 2 ขา ที่ปลายคาน  | 2 DB16          | 1 DB16          |
| เหล็กดัดตั้ง 4 ขา ตลอดแนวคาน  | 2 DB12@ 40      | 2 DB12@ 40      |
| ราคารวม (บาทต่อเมตร)          | 1,930.32        | 1,714.69        |
| ร้อยละความต่างของราคา         | 11.17           |                 |

รายละเอียดของการเสริมเหล็กในหน้าตัดคานของวิธี TM ของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (รูปที่ 11)



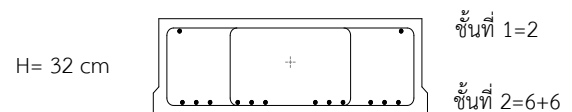
รูปที่ 11 การเสริมเหล็กในคานของ TM ของตัวอย่างทดสอบที่ 1

ผลการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (รูปที่ 12) โดยพบว่า สมการเป้าหมายมีราคารวม 1714.69 บาทต่อเมตร และมีรอบคำตอบที่ 109 รอบ โดย HCA ได้ค้นหาเป้าหมายเป็นรอบการทำงาน ลักษณะเส้นกราฟได้บ่งชี้ถึงเส้นทางการค้นหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมในการออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม



รูปที่ 12 การเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสม HCA ของตัวอย่างทดสอบที่ 1

รายละเอียดของการเสริมเหล็กในหน้าตัดคานของ HCA ของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (รูปที่ 13)



รูปที่ 13 การเสริมเหล็กในคานของ HCA ของตัวอย่างทดสอบที่ 1

ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของทั้งสองวิธี (ตารางที่ 10) พบว่า HCA ประหยัดกว่า TM เพราะเผื่อน้อยกว่า ดังนั้นความต่างเพื่อสุทธิของโมเมนต์ดัดร้อยละ 10.10 และ 18.10 ตามลำดับ สำหรับความต่างเพื่อสุทธิของแรงเฉือนร้อยละ 18.56 และ 21.07 ตามลำดับเช่นกัน

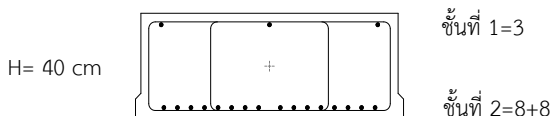
## 5.2 ตัวอย่างทดสอบที่ 2

ตารางที่ 11 แสดงข้อมูลผลการออกแบบที่เหมาะสม โดย TM และ HCA ได้ออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม โดยจากผลการเปรียบเทียบราคา TM มีความสิ้นเปลืองกว่า HCA ซึ่งมีราคารวม 2,373.34 2,019.14 บาทต่อเมตร ตามลำดับ และราคาความต่างร้อยละ 14.92

ตารางที่ 11 ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ TM และ HCA  
ตัวอย่างทดสอบที่ 2

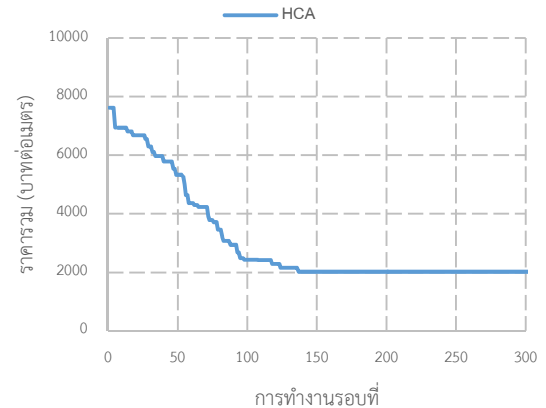
| วิธีที่ใช้คำนวณ                                                         | TM              | HCA             |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| $f'_c$ (ksc)                                                            | 550             | 550             |
| $f_y$ (ksc)                                                             | 3,000           | 3,000           |
| $f_{pu}$ (ksc)                                                          | 18,600          | 18,600          |
| ขนาดความลึก H (cm)                                                      | 40              | 38              |
| โมเมนต์ดัดประลัย $M_u$ (kg-m)                                           | 65,750          | 65,340          |
| กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด $M_n$ (kg-m)                                     | 83,750          | 78,250          |
| แรงเฉือนประลัย $V_u$ (kg)                                               | 26,120          | 25,820          |
| กำลังต้านทานแรงเฉือน $V_n$ (kg)                                         | 45,200          | 44,150          |
| ตรวจสอบการโก่งหรือแอ่นตัว ( $\delta \leq -12.5$ mm) ขณะใช้งาน เนื่องจาก |                 |                 |
| น้ำหนักจรของรถบรรทุก (L/800)                                            | -0.01           | -9.20           |
| น้ำหนักบรรทุกคงที่ในระยะยาว                                             | +1.04           | +4.10           |
| จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 1                                           | 3- $\phi 12.7$  | 2- $\phi 12.7$  |
| จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 2                                           | 16- $\phi 12.7$ | 14- $\phi 12.7$ |
| เหล็กดัดตั้ง 2 ขา ที่ปลายคาน                                            | 3 DB16          | 2 DB16          |
| เหล็กดัดตั้ง 4 ขา ตลอดแนวคาน                                            | 2 DB12@ 40      | 2 DB12@ 40      |
| ราคารวม (บาทต่อเมตร)                                                    | 2,373.34        | 2,019.14        |
| ร้อยละความต่างของราคา                                                   | 14.92           |                 |

รายละเอียดของการเสริมเหล็กในหน้าตัดคานของ TM ของตัวอย่างทดสอบที่ 2 (รูปที่ 14)



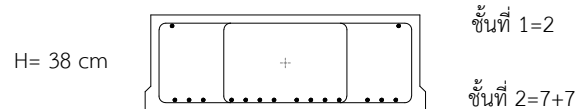
รูปที่ 14 การเสริมเหล็กในคานของ TM ของตัวอย่างทดสอบที่ 2

ผลการรู้เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างทดสอบที่ 2 (รูปที่ 15) โดยพบว่า สมการเป้าหมายมีราคารวมเท่ากับ 2,019.14 บาทต่อเมตร และมีรอบค่าตอบที่ 137 รอบ โดย HCA ได้ค้นหาเป้าหมายเป็นรอบการทำงาน ลักษณะเส้นกราฟได้บ่งชี้ถึงเส้นทางการค้นหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม ในการออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม



รูปที่ 15 การรู้เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสม HCA ของตัวอย่างทดสอบที่ 2

รายละเอียดของการเสริมเหล็กในหน้าตัดคานของ HCA ของตัวอย่างทดสอบที่ 2 (รูปที่ 16)



รูปที่ 16 การเสริมเหล็กในคานของ HCA ของตัวอย่างทดสอบที่ 2

ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของทั้งสองวิธี (ตารางที่ 11) พบว่า HCA ประหยัดกว่า TM เพราะเผื่อน้อยกว่า ดังนั้นความต่างเพื่อสุทธิของโมเมนต์ดัดร้อยละ 6.49 และ 11.49 ตามลำดับ สำหรับความต่างเพื่อสุทธิของแรงเฉือนร้อยละ 26.51 และ 27.21 ตามลำดับเช่นกัน

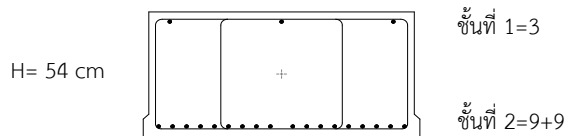
## 5.3 ตัวอย่างทดสอบที่ 3

ตารางที่ 12 แสดงข้อมูลผลการออกแบบที่เหมาะสม โดยพบว่า TM และ HCA ได้ออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม โดยจากผลการเปรียบเทียบราคา TM มีความสิ้นเปลืองกว่า HCA ซึ่งมีราคารวม 2,910.63 2,474.17 บาทต่อเมตร ตามลำดับ และราคาความต่างร้อยละ 15.0

ตารางที่ 12 ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ TM และ HCA  
ตัวอย่างทดสอบที่ 3

| วิธีที่ใช้คำนวณ                                                      | TM              | HCA             |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| $f'_c$ (ksc)                                                         | 550             | 550             |
| $f_y$ (ksc)                                                          | 3,000           | 3,000           |
| $f_{pu}$ (ksc)                                                       | 18,600          | 18,600          |
| ขนาดความลึก H (cm)                                                   | 54              | 52              |
| โมเมนต์ดัดประลัย $M_u$ (kg-m)                                        | 98,420          | 97,900          |
| กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด $M_n$ (kg-m)                                  | 137,510         | 110,210         |
| แรงเฉือนประลัย $V_u$ (kg)                                            | 31,330          | 30,980          |
| กำลังต้านทานแรงเฉือน $V_n$ (kg)                                      | 64,000          | 63,450          |
| ตรวจสอบการโก่งหรือแอ่นตัว ( $\delta \leq 15$ mm) ขณะใช้งาน เนื่องจาก |                 |                 |
| น้ำหนักจรของรถบรรทุก (L/800)                                         | -0.05           | -6.50           |
| น้ำหนักบรรทุกคงที่ในระยะยาว                                          | +1.58           | +9.30           |
| จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 1                                        | 3- $\phi$ 12.7  | 2 $\phi$ 12.7   |
| จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 2                                        | 18- $\phi$ 12.7 | 14- $\phi$ 12.7 |
| เหล็กดัดตั้ง 2 ขา ที่ปลายคาน                                         | 3 DB16          | 2 DB16          |
| เหล็กดัดตั้ง 4 ขา ตลอดแนวคาน                                         | 2 DB12@ 40      | 2 DB12@ 40      |
| ราคารวม (บาทต่อเมตร)                                                 | 2,910.63        | 2,474.17        |
| ร้อยละความต่างของราคา                                                | 15.0            |                 |

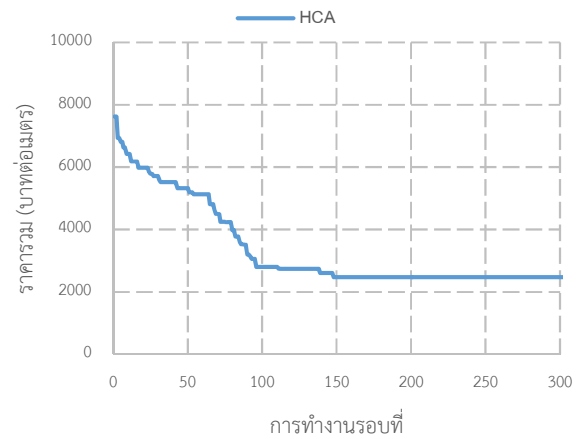
รายละเอียดของการเสริมเหล็กในหน้าตัดคานของ TM ของตัวอย่างทดสอบที่ 3 (รูปที่ 17)



รูปที่ 17 การเสริมเหล็กในคานของ TM ของตัวอย่างทดสอบที่ 3

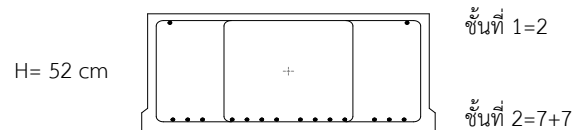
ผลการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างทดสอบที่ 3 (รูปที่ 18) โดยพบว่า สมการเป้าหมายมีราคารวมเท่ากับ 2,474.17 บาทต่อเมตร และมีรอบค่าตอบที่ 148 รอบ โดย HCA ได้ค้นหาเป้าหมายเป็นรอบการทำงาน ลักษณะเส้นกราฟได้บ่งชี้ถึงเส้นทางการค้นหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม ในการออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม

ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของทั้งสองวิธี (ตารางที่ 12) พบว่า HCA ประหยัดกว่า TM เพราะเมื่อน้อยกว่า ดังนั้นความต่างเพื่อสุทธิของโมเมนต์ดัดร้อยละ 1.17 และ 18.43 ตามลำดับ สำหรับความต่างเพื่อสุทธิของแรงเฉือนร้อยละ 36.17 และ 36.05 ตามลำดับเช่นกัน



รูปที่ 18 การเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสม HCA ของตัวอย่างทดสอบที่ 3

รายละเอียดของการเสริมเหล็กในหน้าตัดคานของ HCA ของตัวอย่างทดสอบที่ 3 (รูปที่ 22)



รูปที่ 22 การเสริมเหล็กในคานของ HCA ของตัวอย่างทดสอบที่ 3

## 6. อภิปรายผล

จากผลทดสอบของการออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสมด้วย TM และ HCA ในทั้งสามตัวอย่าง พบว่า ทั้ง TM และ HCA สามารถค้นพบค่าตอบในการออกแบบที่ให้ราคาต่ำสุดได้ใกล้เคียงกัน โดย HCA มีความประหยัดกว่า TM ของทั้งสามตัวอย่างทดสอบ เพราะว่า HCA ค้นหาค่าตอบจากค่าสูงสุด และปรับลดมาต่ำสุด เสมือนเริ่มลงจากเขาเพื่อเข้าสู่หาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุด ตามสมการเป้าหมายที่มีราคาต่ำสุด และใช้จำนวนรอบทำงานที่วนซ้ำได้มากขึ้น ซึ่งต่างจาก TM ใช้การคำนวณแบบลองผิดลองถูก หรือจากอัตราส่วนช่วงคานขาด เพียงเพื่อผ่านเงื่อนไขออกแบบและคำนวณแบบวนซ้ำได้น้อยครั้งกว่า HCA

## 7. บทสรุป

ทั้ง TM และ HCA สามารถใช้ออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสมได้ตามมาตรฐาน แต่ HCA สามารถออกแบบได้ประหยัดกว่า TM ทั้งสามตัวอย่างทดสอบร้อยละ 11.17 14.92 และ 15.00 ตามลำดับ ทั้งนี้ HCA เป็นอิวิริสติก

อัลกอริทึมที่ไม่ซับซ้อน พัฒนาง่าย โดยเลือกหน้าตัดอัตโนมัติ ช่วยให้ประหยัดเวลา ลดความผิดพลาด จึงเป็นอีกทางเลือกของวิศวกรที่ยังขาดประสบการณ์ด้านออกแบบ และให้ความสำคัญกับต้นทุนในการก่อสร้าง ดังนั้น HCA จึงเหมาะกับการนำมาใช้ออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงได้อย่างเหมาะสม

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีต และคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Moothong N. The evolution of the bridge construction by Prestressed concrete technology, *Department of Science Service*. 2019;68( 2019) : 37- 38 Available from: <http://www.siweb1.dss.go.th>journal> [Accessed 16<sup>th</sup> May 2020].
- [2] Chorwichian V, Chorwichian V. Prestressed concrete fundamental. In: *Reinforced Concrete Design ( Strength Design Method: SDM) .* Newthaimitra publishing ( 1996) Co, Bangkok; 2017.p 507-532
- [3] Akin A, Saka MP. Harmony search algorithm bases optimum detailed design of reinforced plan concrete frames subject to ACI 318 - 05 provisions, *Computers and Structures*. 2015; 147:79–95.
- [4] Aga AAA, Adam FM. Design optimization of Reinforced concrete frames, *Open Journal of Civil Engineering*. 2015;5:34–48.
- [5] Tapown A, Cheerarot R. Optimal parameters and performance of Artificial bee colony algorithm for minimum cost design of reinforced concrete frames, *Engineering Structures*. 2017;151: 802–820.
- [6] Limkamontip W, Anunthanakul N. Using Genetic Algorithm to Design and Optimize Prestressed concrete Beam Bridges. *Civil Engineering*, King Mongkut’ s Institute of Technology North Bangkok. 2005: ISBN 974- 19- 0613- 7. Available from: <https://www.newtdc.thailis.or.th>docview> [Accessed 25<sup>th</sup> July 2019].
- [7] Banluepuch N, Smithakorn W. Optimum Design of Prestressed Concrete Box Girder Bridges using Particle Swarm Optimization, *The 24<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering (NCCE24), Civil Engineer’s Contribution to Thailand 4.0<sup>+</sup>*, 10-12 July 2019, Centara Hotel & Convention Centre .Udon Thani, STR052, 2562.p.491–501.
- [8] Esfandiari MJ, Urgessa GS, Sheikholarefin S, Manshadi SHD. Optimum design of 3D reinforced concrete frames using DMPSO Algorithm, *Advances in Engineering Software*. 2018;115:149–160.
- [9] Tapown A, Lamom A, Cheerarot R Optimum Design of Reinforced concrete rectangular column using Hill climbing algorithm. *Research and development journal of the engineering institute of Thailand*. 2555;23(2):28–35.
- [10] AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*, Fifteenth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., 1992
- [11] The Engineering institute of Thailand, *Standard of prestressed concrete building, Strength Design method, (E.I.T. Standard 1009-34)*. Global graphic Co, Bangkok, 2553.
- [12] Vivithkeyoonvong S. *Design of Prestressed concrete*. Civil Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2555.
- [13] Pearl J. *Heuristic: Intelligent search strategies for computer problem solving*, Addison- Wesley Publishing Co., Reading, 1984.
- [14] *Committee of construction price, Labor account / operation for estimate and calculate price ( revised edition) : 2016*, Bangkok, Thailand. Available from: <https://www.yotathai.com> [Accessed 2<sup>nd</sup> August 2019].