

การออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบตันที่เหมาะสม ด้วยอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง

Optimum Design of Prestressed Concrete Plank Girder Using Bisection Algorithm

สัมฤทธิ์ ชมชื่น และ อลงกรณ์ ละม่อม*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

E-mail: sam_eng10@yahoo.com, alongkorn_lamom@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงสำหรับการออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบตันที่เหมาะสม เพื่อหาตัวแปรออกแบบตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย วสท. 1009-34, 2553 ด้วยวิธีกำลัง สำหรับน้ำหนักของรถบรรทุกทุกแบบ HS20 – 44 ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD 1992 อัลกอริทึมถูกพัฒนาและเปรียบเทียบกับ Hill climbing algorithm ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์ วิซวลเบสิก 6.0 และทดสอบกับตัวอย่างที่ใช้บ่อย 3 ตัวอย่าง เป็นคานช่วงเดียวมีฐานรองรับแบบง่ายที่แตกต่างกันที่ช่วงความยาวพาด ซึ่งมีฟังก์ชันเป้าหมายคือหาราคาต่ำสุด ตัวแปรออกแบบประกอบด้วย กำลังของคอนกรีต (f_c') กำลังครากของเหล็กเสริม (f_y) กำลังดึงประลัยของลวดเกลียวอัดแรง (f_{pu}) ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม ลวดเกลียวอัดแรง และขนาดของหน้าตัดคาน จากผลการศึกษาพบว่า เฉลี่ยร้อยละ 25.26 ของอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง มีการประมวลผลผลลัพธ์ที่รวดเร็วกว่า Hill climbing algorithm

คำสำคัญ : การออกแบบที่เหมาะสม; อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง; คอนกรีตอัดแรง; คานสะพานแบบตัน; การออกแบบสะพาน

Abstract

This research proposes an application of a bisection algorithm for optimization design of prestressed concrete plank girder in order to determine the design parameters based on the Engineering Institute of Thailand standard, E.I.T. 1009 – 34, B.E. 2553 by strength design method for truck HS20 – 44 according to AASHTO LRFD 1992 standards. The algorithm was developed and compared with hill climbing algorithm 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 girder. The objective function is to convergence 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-section area of plank girder. The result from the experiment showed that bisection algorithm had 25.26 % faster processing time than hill climbing algorithm.

Keywords: Optimum design; Bisection algorithm; Prestressed concrete; Plank Girder; Bridge design

1. บทนำ

สะพานเป็นโครงสร้างสาธารณะที่ใช้ในการคมนาคมทางบก ใช้เป็นเส้นทางสัญจรและขนส่งสินค้าระหว่างกลุ่มชุมชนต่าง ๆ หรือเชื่อมต่อกับประเทศเพื่อนบ้าน สะพานมักสร้างขึ้นเพื่อข้ามทะเล แม่น้ำใหญ่ ลำคลอง หรือทำเป็นทางยกระดับ การพัฒนาสะพานคอนกรีตอัดแรงได้เริ่มขึ้นในยุโรปภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 [1] เมื่อสะพานข้ามแม่น้ำ Rhine และแม่น้ำสายสำคัญอื่นๆ ในยุโรปถูกทำลายเกือบหมดสิ้นประจวบเหมาะกับการขาดแคลนเหล็ก ส่งผลให้นิยมใช้ระบบคอนกรีตอัดแรงในการสร้างสะพานช่วงปานกลาง และช่วงยาว ๆ ในสหรัฐอเมริกา ภายหลังจากการสร้างสะพาน Walnut Lane ที่เมือง Philadelphia ในปี ค.ศ.1950 ในยุคนั้นการสร้างสะพานเหล็กก็เริ่มลดลง ในขณะที่สะพานคอนกรีตอัดแรงเพิ่มเป็นร้อยละ 78 [1] การที่สะพานคอนกรีตอัดแรงเป็นที่นิยมมากขึ้นในประเทศต่าง ๆ เป็นเพราะสะพานชนิดนี้สามารถควบคุมการแตกร้าวและการโก่งตัวได้ดี การก่อสร้างทำได้รวดเร็วในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ สำหรับในประเทศไทยมีการใช้สะพานคอนกรีตอัดแรงพอสมควร โดยสะพานช่วงสั้นธรรมดา น้อยกว่า 20-30 เมตร มักใช้ระบบคานคอนกรีตอัดแรงแบบดิงลวดก่อน

กระบวนการก่อสร้างของระบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงมีสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการผลิตชิ้นส่วนของคานเรียก ระบบหล่อสำเร็จรูป (Precast concrete) ชนิดดิงลวดเกลียวอัดแรงก่อนความกว้างไม่เกิน 1.00 เมตร ความยาวตามแบบที่ระบุ การหล่อทำได้ครั้งละหลายคานตามแนวยาวของแท่นหล่อ (Casting bed) และขั้นตอนสุดท้าย คือการติดตั้งที่หน้างาน โดยการใส่เหล็กเสริมธรรมดาคลายตะแกรง สานติดกับเหล็กดัดที่โผล่จากหลังคาน จึงเทคอนกรีตทับหน้าหล่อในที่เป็นเสมือนคานตัวเดียวกัน (Monolithic) เรียกหน้าตัดคานเชิงประกอบ (Composite section) สำหรับการออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงในขั้นตอนแรกนั้น ที่ผ่านมามีวิศวกรออกแบบต้องอาศัย

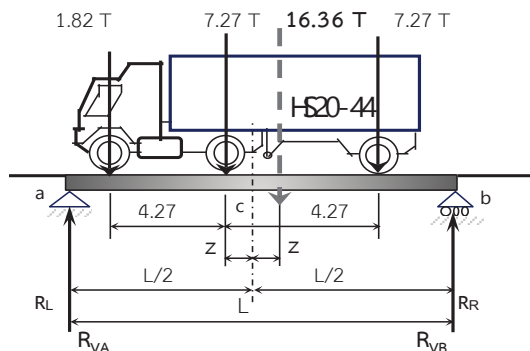
ประสบการณ์และความชำนาญ เช่นประมาณค่าความลึกของคานแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) โดยการประมาณด้วยอัตราส่วนของช่วงความยาวพาด $L/15$ ถึง $L/25$ [2] แต่อาจไม่คำนึงถึงความประหยัดในการก่อสร้างสะพาน

ปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) เพื่อช่วยในการออกแบบให้มีความรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยสามารถใช้วิธีออกแบบโครงสร้างด้วยหลักการอัลกอริทึม (Algorithms) ในการช่วยค้นหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสม ได้แก่ การคำนวณขนาด และหน้าตัดของโครงสร้างให้รับน้ำหนักบรรทุกทุกต่าง ๆ ได้อย่างปลอดภัย ตามข้อกำหนดการออกแบบ และได้ราคาต่ำสุดในการก่อสร้าง ฉะนั้นอัลกอริทึมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในงานออกแบบโครงสร้างทั่วไป อาทิ Akin และคณะ [3] ใช้อัลกอริทึม Harmony search (HS) เพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และ Aga และคณะ [4] ทดสอบใช้ Artificial neural networks (ANN) ออกแบบโครงข้อแข็งของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และ Tapown และคณะ [5] นำ Artificial bee colony (ABC) ออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก และ Limkamontip W. [6] ประยุกต์ใช้ Genetic algorithm (GA) ออกแบบหาค่าที่เหมาะสมของคานสะพานคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดตัวไอ (I-Section) และ Banluepuech และคณะ [7] ใช้ Particle swarm optimization (PSO) ออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานสะพานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องกลวง (Box Girder Bridge) และ Tapown และคณะ [8] ได้นำ Artificial bee colony (ABC) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหน้าตัดที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และ Tapown และคณะ [9] ยังได้นำ Hill climbing algorithm (HCA) มาใช้ในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า และท้ายสุด Patchotichai และคณะ [10] ใช้ Bisection algorithm (BA) มาใช้ออกแบบเสาสี่เหลี่ยมคอนกรีตเสริมเหล็กกับแรงตามแนวแกน ซึ่งผลการวิจัยพบว่า Bisection algorithm มีประสิทธิภาพที่ดีในการออกแบบเสาสี่เหลี่ยม แต่ยังไม่ได้นำใช้ในงานวิจัยออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบตัน

งานวิจัยนี้จึงพัฒนา และทดสอบ Bisection algorithm (BA) มาใช้ออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม และเปรียบเทียบกับ Hill climbing algorithm (HCA) [9] โดยสร้างโปรแกรมออกแบบด้วยไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก 6.0 เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมในการออกแบบ เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพการทำงานของทั้งคู่ ซึ่งจุดเด่น Bisection algorithm คือ มีขั้นตอนทำงานไม่ซับซ้อน เข้าใจได้ง่าย สะดวกในการพัฒนาเช่นเดียวกันกับ Hill climbing algorithm แต่มีความเร็วรอบในการทำงานที่ดีกว่า

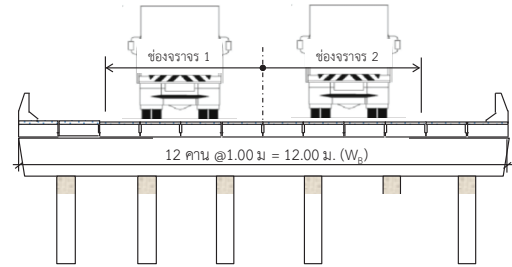
2. ทฤษฎีและการออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบตัน

2.1 น้ำหนักบรรทุกทุกขงรถบรรทุกแบบ HS20-44 [11] ตำแหน่งของรถบรรทุกที่ถ่ายน้ำหนักลงบนคานสะพานที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดมากที่สุด และระยะของแรงลัพธ์ตามทฤษฎีของ Varignon (กลศาสตร์วิศวกรรม) ระยะ Z เท่ากับ 1.07 1.07 และ 0.71 เมตร สำหรับช่วงพาด 8.0 10.0 และ 12.0 เมตร ตามลำดับ สำหรับช่วงพาด 8.0 และ 10.0 เมตร ใช้แรงลัพธ์เท่ากับ 14.54 T (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ตำแหน่งของรถบรรทุกบนสะพาน
ที่ทำให้ โมเมนต์ดัดสูงสุด

การกระจายน้ำหนักบรรทุกทุกขงล้ออ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO [11] และกำหนดจำนวนช่องจราจรเท่ากับ สอง ช่องจราจร (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 สะพานแบบสองช่องจราจรที่ใช้วิเคราะห์
คำนวณค่าพารามิเตอร์ ในการออกแบบ ดังสมการที่
1 และ 2 ตามลำดับ

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

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

โดยที่ S คือ ความกว้างของคานมีค่าเท่ากับ 1.0 เมตร K เท่ากับ 0.7 สำหรับคานแบบตัน W_B คือ ความกว้างของสะพาน L คือ ความยาวช่วงคานพาด N_L และ คือ จำนวนของช่องจราจร และใช้ค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (1) และ (2) เพื่อคำนวณค่าสัดส่วนของน้ำหนักล้อ (Wheel Load Fraction, WLF) บนคานหลักของแต่ละตัว ที่คูณกับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนในช่องจราจร ดังสมการ

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

ตัวคูณเพิ่มของน้ำหนักกระแทก (Impacted load)

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

2.2 ค่าตัวคูณเพิ่ม สำหรับหน้าตัดเป็นแบบคานปกติ และคานเชิงประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าตัวคูณเพิ่มในคำนวณการโก่งหรือแอ่น
ตัวของคานในสภาวะขณะถ่ายแรง ตามมาตรฐาน
AASHTO [11]

ขณะถ่ายแรง	คานปกติ	คานเชิงประกอบ
โก่งตัวลงเนื่องจากน้ำหนัก ตัวคาน	1.85	1.85
โก่งตัวขึ้นเนื่องจากอัดแรง ขณะติดตั้ง	1.80	1.80

ตารางที่ 2 ค่าตัวคูณเพิ่มในคำนวณการโก่งหรือแอ่นตัวของคานในสภาวะใช้งาน ในระยะยาว ตามมาตรฐาน AASHTO [11]

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

การควบคุมระยะโก่งหรือการแอ่นตัวของคาน (Deflection) สูงสุดไม่เกินพิกัดที่กำหนดของ AASHTO โดยพิจารณาจากกรณีบรรทุกแบบ HS20-44 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพิกัดการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐาน [11]

ประเภทของชิ้นส่วน	การโก่งตัวที่พิจารณา	พิกัดการโก่งตัว	
		สะพานที่ไม่มีคนเดิน	สะพานที่มีคนเดิน
คานช่วงพาดเดียวหรือคานต่อเนื่อง	น้ำหนักบรรทุกจรร่วมกับแรงกระทบ	L/800	L/1000

2.3 โมเมนต์ดัดประลัย ใช้น้ำหนักบรรทุกกลุ่ม 1 ตามมาตรฐานของ AASHTO [11] ดังสมการ

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

โดยที่ M_D คือ โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ตายตัว

M_{L+IM} คือ โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักของรถบรรทุกในช่องจราจร และแรงกระทบ

โดยที่ โมเมนต์ดัดระบุคำนวณได้ ดังสมการ

$$\phi M_n = \phi \cdot A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot d_p \cdot \left[1 - 0.59 \cdot \rho_p \cdot \frac{f_{ps}}{f_c'} \right] \quad (6)$$

2.4 แรงเฉือนประลัย (Ultimate shear strength) และน้ำหนักบรรทุกเพิ่มค่า [11] ดังสมการ

$$V_u = 1.3(V_D + 1.67 V_{L+IM}) \quad (7)$$

โดยที่ V_D คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ตายตัว

V_{L+IM} คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักของรถบรรทุกในช่องจราจร และแรงกระทบ

2.5 ลวดเกลียวอัดแรงสำหรับงานคอนกรีตอัดแรง ใช้ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวชนิด 7 เส้นโดยลวด 6 เส้นพันรอบเส้นที่ 7 ประเภทคลายแรงต่ำ (Low relaxation) (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรงตามมาตรฐานมอก.420-2540

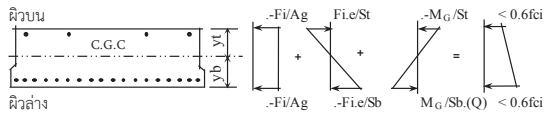
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	กำลังดึงประลัย (kg)	พื้นที่หน้าตัดประสิทธิผล (mm ²)
เกรด 1860 (270K)		
11.11	14070	74.2
12.7	18765	98.7

2.6 พิกัดหน่วยแรงในคอนกรีตภายใต้สถานะสิ้นสุดการใช้งาน (Stress Limitations) หน่วยแรงชั่วคราวในคอนกรีต ทันทีที่ถ่ายแรงจากลวดเกลียวอัดแรง และต้องไม่เกินค่าพิกัด (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 หน่วยแรงปลอดภัยในคอนกรีตขณะถ่ายแรง ตามมาตรฐาน ACI code และวสท.[12]

หน่วยแรงปลอดภัยในคอนกรีต	หน่วยเป็น (ksc)
1.1 หน่วยแรงอัดในองค์อาคาร	
หน่วยแรงอัดเริ่มแรก	0.80 f_c'
ที่เกิดจากการอัดแรงเป็นรูปสามเหลี่ยม	0.60 f_{ci}
1.2 หน่วยแรงดึงในองค์อาคาร	
ที่ไม่มีเหล็กเสริมธรรมดายึดเหนี่ยว	0.80 $(f_{ci})^{0.5}$
ที่ปลายคานของผิวบนขององค์อาคาร	1.60 $(f_{ci})^{0.5}$

2.6.1 การคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตขณะถ่าย
แรงเข้าสู่หน้าตัดคาน [13] ด้วยตำแหน่งของลวดเกลียว
อัดแรงเยื้องศูนย์ทำให้คานมีพฤติกรรมยกตัวขึ้นและ
คำนวณตามสมการ (8) ถึง (11) และ ภาพที่ 3



ภาพที่ 3 หน่วยแรงในหน้าตัดคานที่ขณะถ่ายแรง
หน่วยแรงที่ปลายคานผิวบน

$$\sigma_1 = \left[\frac{-F_i}{A_G} \right] + \left[\frac{F_i \cdot e}{S_t} \right] \leq 1.6 \sqrt{f_{ci}} \quad (8)$$

หน่วยแรงที่ปลายคานผิวล่าง

$$\sigma_2 = \left[\frac{-F_i}{A_G} \right] - \left[\frac{F_i \cdot e}{S_b} \right] \leq 0.6 \cdot f_{ci} \quad (9)$$

หน่วยแรงที่กึ่งกลางคานผิวบน

$$\sigma_3 = \left[\frac{-F_i}{A_G} \right] + \left[\frac{F_i \cdot e}{S_t} \right] - \left[\frac{M_G}{S_t} \right] \leq 0.6 \cdot f_{ci} \quad (10)$$

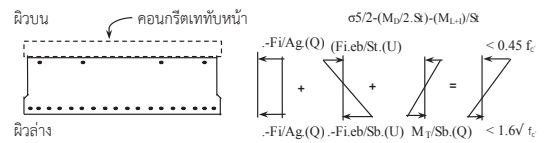
หน่วยแรงที่กึ่งกลางคานผิวล่าง

$$\sigma_4 = \left[\frac{-F_i}{A_G} - \frac{F_i \cdot e}{S_b} \right] + \left[\frac{M_G}{S_b} \cdot Q \right] \leq 0.6 \cdot f_{ci} \quad (11)$$

2.6.2 คำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากน้ำ
หนักบรรทุกทุกขณะใช้งาน [13] (หลังการเสื่อมลดทั้งหมด
ของแรงดึง) จะต้องไม่เกินค่าที่พิกัด (ตารางที่ 6) และ
ภาพที่ 4

ตารางที่ 6 หน่วยแรงปลอดภัยในคอนกรีตขณะใช้งาน
ตามมาตรฐาน ACI code และ วสท.[12]

หน่วยแรงปลอดภัยในคอนกรีต	หน่วยเป็น (ksc)
กำหนดให้คอนกรีตมีอายุครบ 28 วัน	
เนื่องจากหน่วยแรงอัด	0.45 f_c'
หน่วยแรงดึงในบริเวณที่เคยถูกอัดแรงมาก่อน	1.60 $(f_c')^{0.5}$



ภาพที่ 4 หน่วยแรงในหน้าตัดคานที่ขณะใช้งาน

หน่วยแรงที่ปลายคานผิวบน

$$\sigma_5 = \left[\frac{-F_i}{A_G} \cdot Q \right] + \left[\frac{F_i \cdot e}{S_t} \cdot U \right] \leq 1.6 \sqrt{f_{ci}} \quad (12)$$

หน่วยแรงที่ปลายคานผิวล่าง

$$\sigma_6 = \left[\frac{-F_i}{A_G} \cdot Q \right] + \left[\frac{F_i \cdot e}{S_b} \cdot U \right] \leq 0.45 \cdot f_{ci} \quad (13)$$

หน่วยแรงที่กึ่งกลางคานผิวบน

$$\sigma_7 = \frac{\sigma_5}{2} - \left[\frac{M_D}{2 \cdot S_t} \right] - \left[\frac{M_{L+IM}}{S_t} \right] \leq 0.45 \cdot f_{ci} \quad (14)$$

หน่วยแรงที่กึ่งกลางคานผิวล่าง

$$\sigma_8 = \left[\frac{-F_i}{A_G} - \frac{F_i \cdot e}{S_b} \right] + \left[\frac{M_T}{S_b} \cdot Q \right] \leq 1.6 \sqrt{f_{ci}} \quad (15)$$

โดยที่ F_i คือ หน่วยแรงอัดที่ถ่ายเข้าสู่คานแรกเริ่ม

F_e คือ หน่วยแรงอัดประสิทธิภาพขณะใช้งาน

f_{ci} คือ กำลังอัดของคอนกรีตในขณะถ่ายแรง

A_G คือ เนื้อที่ทั้งหมดของหน้าตัดคาน

M_G คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักตัวคาน

M_T คือ ผลการรวมโมเมนต์ทั้งหมด

I_G คือ โมเมนต์เฉื่อยของคาน

e คือ ระยะเยื้องศูนย์ของกลุ่มลวดเกลียวอัดแรง

S_t คือ โมดูลัสของหน้าตัดคานจากจุดศูนย์ถ่วง

ถึงผิวบนของคาน

S_b คือ โมดูลัสของหน้าตัดคานจากจุดศูนย์ถ่วง

ถึงผิวล่างของคาน

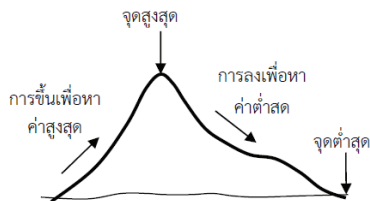
Q คือ ตัวคูณลดกำลังของหน่วยแรง

$\frac{F_e}{F_i}$ และ U คือ ตัวคูณลดกำลังของโมดูลัส

หน้าตัดคาน $\frac{S_t}{S_b}$

3. อัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบ

3.1 วิธีแบบจำลองปีนเขา Hill Climbing Algorithm (HCA) ในปี ค.ศ.1984 Pearl [14] ได้นำเสนอเป็นครั้งแรก ซึ่งใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่มีลักษณะเหมือนการปีนเขา โดยนักปีนเขาจะเดินทางไปสู่ยอดเขาได้จะต้องมองหาตำแหน่งยอดเขา แล้วไปให้ถึงจุดนั้น โดยหาเส้นทางที่สั้นที่สุด เพื่อใช้เวลาให้น้อยลง โดยอัลกอริทึมนี้จะหาสถานะเป้าหมายหรือสถานะคำตอบที่ดีที่สุด ที่หาคำตอบเชิง Heuristic Search ซึ่งกำลังนิยมใช้ในการแก้ปัญหาในด้านความเหมาะสมหลาย ๆ ปัญหา เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับค่าสูงสุด หรือต่ำสุดในลักษณะการหาคำตอบเชิงกราฟ (Graph Search Algorithm) [15] ซึ่งคล้ายการไต่ขึ้นเขา และลงจากเขาในแนวตั้งตลอดสู่เป้าหมาย ตามสมการเป้าหมาย และการสุ่มค่าที่อยู่ในช่วงที่กำหนด (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 การปีนเขาข้อมูลของวิธีแบบจำลองการปีนเขา (HCA)

ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม (ภาพที่ 7) ดังนี้

1. การสร้างสถานะเริ่มต้น เป็นการสร้างสถานะคำตอบแรก ขึ้นด้วยการสุ่มตัวแปรออกแบบของปัญหาที่กำหนดไว้ เพื่อเข้าสู่กระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสม
2. การสร้างสถานะใหม่ เป็นการสร้างคำตอบใหม่ด้วยการปรับเปลี่ยนจากคำตอบเดิมเล็กน้อย ซึ่งปัญหานี้คือการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของ กำลังคอนกรีต กำลังครากของเหล็กเสริม ความลึกคาน ขนาด และปริมาณลวดเกลียวอัดแรง โดยสุ่มขึ้นหนึ่งขั้นหรือสุ่มลดหนึ่งขั้นในบางตำแหน่ง (ภาพที่ 6) 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		-1	450	3000	25	11.1	8
0	450	3000	35	11.1	12	➡	0	500	3000	30	12.7	10
+1	500	4000	40	12.7	14		+1	550	4000	35	12.7	12

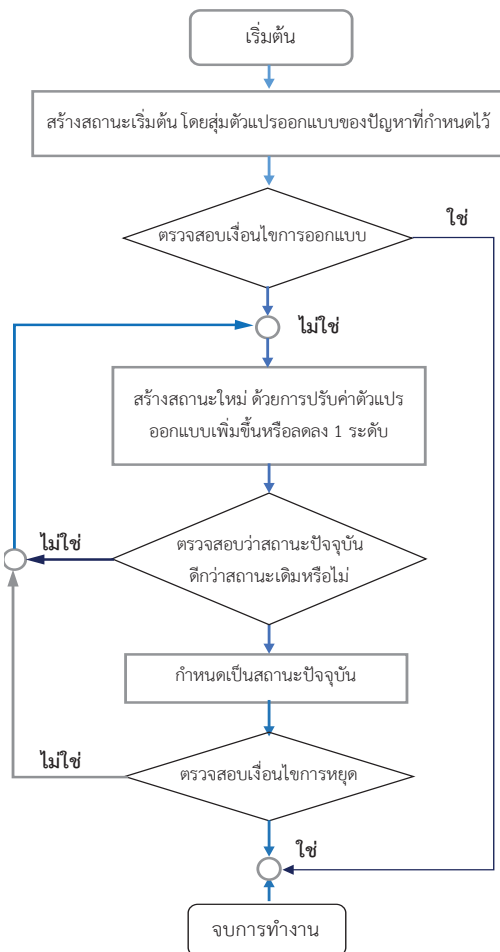
ก) ค่าตอบเดิม

ข) ค่าตอบใหม่

ก) คำตอบเดิม

ข) คำตอบใหม่

ภาพที่ 6 ลักษณะการปรับคำตอบของวิธีแบบจำลองการปีนเขา (HCA)



ภาพที่ 7 กระบวนการทำงานของวิธีแบบจำลองการปีนเขา (HCA)

3.2 วิธีแบ่งครึ่งช่วง Bisection Algorithm (BA) [16] คือ การกำหนดขอบเขตของการแทนค่า x น้อยสุด ($x_{\min}$) และมากที่สุด ($x_{\max}$) แล้วบีบช่วงระหว่างสองค่านี้ให้แคบลงด้วยการหาค่าแบ่งครึ่งช่วงทีละครั้งไปเรื่อย ๆ แล้วนำค่าไปแทนในฟังก์ชันจนกว่าจะได้ค่าศูนย์ตามขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่า ($x_{\min}$) และ ($x_{\max}$) ซึ่ง > 0
2. คำนวณพารามิเตอร์โดยการแบ่งครึ่งช่วง

$$\text{โดยที่ } X_{\text{mid}} = \left[\frac{X_{\max} + X_{\min}}{2} \right]$$

3. คำนวณค่าต่อไปเพื่อค้นหาคำตอบของรากสมการที่อยู่บนช่วงที่กำหนด

3.1 ถ้าคำตอบของรากสมการอยู่จากกึ่งกลางลงมาหาค่า ($x_{\min}$) ดังนั้นให้ ($x_{\max} = x_{\text{mid}}$) และกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 2

3.2 ถ้า $f(x_{\min}) \times f(x_{\text{mid}}) > 0$, คำตอบของรากสมการจะอยู่จากกึ่งกลางช่วงขึ้นไปหาค่า ($x_{\max}$) ดังนั้นให้ ($x_{\min} = x_{\text{mid}}$) และกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 2

4. คำนวณค่าความผิดพลาดที่กำหนด

$$\text{โดย } \varepsilon = \left| \frac{X_{\text{mid new}} - X_{\text{mid old}}}{X_{\text{mid new}}} \right| \times 100\%$$

ถ้า $\varepsilon \leq \varepsilon_s$ หยุดทำซ้ำ ถ้า $\varepsilon > \varepsilon_s$ ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่ง $\varepsilon \leq \varepsilon_s$ จึงหยุดทำซ้ำ

โดย ε_s เป็นค่าที่ใช้กำหนดเพื่อหยุดการทำงานอาจกำหนดให้มีค่าน้อย ๆ ตามลักษณะของงาน เช่น 0.00001 อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ใช้อีกวิธีในการหยุดการทำงาน โดยใช้การกำหนดรอบสูงสุดที่ 1800 รอบเพื่อหยุดการทำงานแทน

ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม BA ดังแสดงในภาพที่ 8 มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดขนาดหน้าตัดคานสูงสุดจากความลึก ($h_{\max}$) และขนาดหน้าตัดคานต่ำสุดจากความลึก ($h_{\min}$) และสมมติราคาของหน้าตัดคาน (h_{mid}) ไว้สูง เพื่อเริ่มการทำงานรวมถึงตั้งให้หน้าตัดคานที่ดีที่สุดในครั้งแรกเท่ากับหน้าตัดคานที่กำหนดให้มีความมากไว้ก่อน

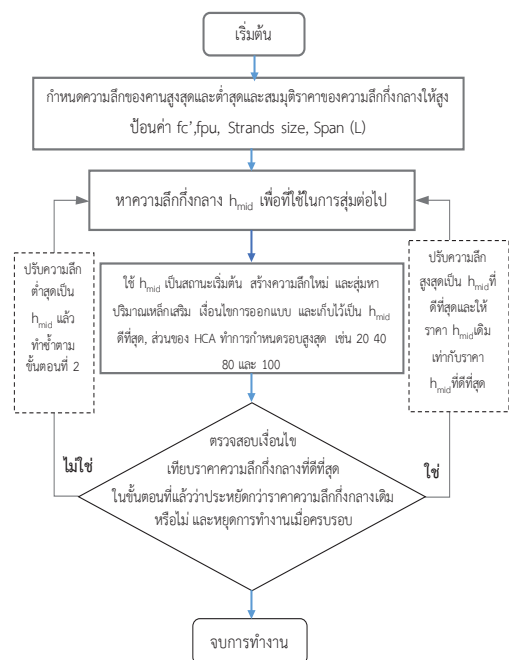
2. คำนวณความลึกกึ่งกลาง (h_{mid}) ดังสมการ

$$h_{\text{mid}} = \left(\frac{h_{\max} + h_{\min}}{2} \right) \quad (16)$$

3. ทำการสุ่มความลึกของคานที่ใกล้เคียงกับความลึกกึ่งกลางของ (h_{mid}) ที่คำนวณได้ เพื่อสร้างความลึก และรูปแบบการเสริมเหล็กใหม่ ตรวจสอบความลึกของคานว่าสามารถรับน้ำหนัก และประหยัดกว่าความลึกที่ดีที่สุดหรือไม่ หากดีกว่าให้บันทึกความลึกที่ดีที่สุดไว้

4. เทียบราคาความลึกกึ่งกลาง (h_{mid}) เดิมกับราคาของความลึกที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 หากความลึกคานที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 มีราคาถูกกว่ากำหนดให้ความลึกคานที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 3 และกำหนดราคาความลึกกึ่งกลาง (h_{mid}) ให้เท่ากับราคาความลึกที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 3 หากไม่ใช่ให้กำหนดค่าความลึกต่ำสุดเท่ากับความลึกที่ดีที่สุดหาได้จากขั้นตอนที่ 3 แทนแล้วกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2

5. หยุดการทำงานเมื่อครบรอบตามที่กำหนดไว้ซึ่งในการทดสอบนี้กำหนดไว้

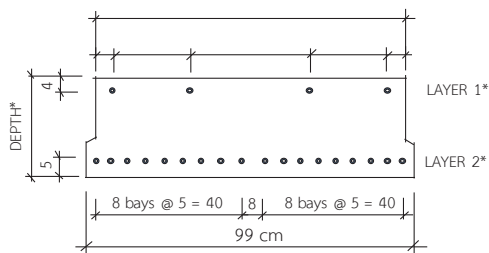


ภาพที่ 8 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม
วิธีแบ่งครึ่งช่วง (BA)

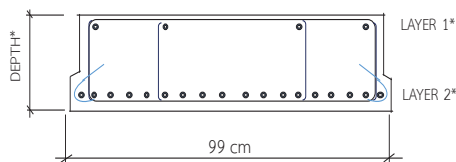
4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 ขอบเขตการทำงาน

โปรแกรมที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ได้ถูกพัฒนาด้วยไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก 6.0 และทดสอบบนวินโดว 7 ในเครื่องที่ใช้ CPU i7 (ตารางที่ 7) แสดงถึงขอบเขตการทำงานของโปรแกรมกำหนดหน้าตัดคานขนาดความลึกสูงสุด (h_{max}) 180 ซม. และปรับลดค่าครวละ 2 ซม. จนถึงความลึกคานต่ำสุด (h_{min}) 20 ซม. ทุกตัวอย่างทดสอบ การจัดตำแหน่งของลวดเกลียวอัดแรงของในแต่ละชั้นให้จัดตามแบบสมมาตร (Symmetry) (ภาพที่ 9 และ 10)



ภาพที่ 9 ตำแหน่งของลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้วิเคราะห์



ภาพที่ 10 ลักษณะการเสริมเหล็กในหน้าตัดคาน

งานวิจัยนี้กำหนดใช้ราคาวัสดุของคอนกรีตผสมเสร็จ และราคาเหล็กเสริมของพาณิชย์จังหวัดมหาสารคามประจำเดือนกันยายน ปี พ.ศ. 2560 ใช้ค่าแรงจากบัญชีค่าแรง และค่าดำเนินการถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2559 [17] (ตารางที่ 7 และ 8)

ตารางที่ 7 ขอบเขตการใช้งานของโปรแกรม

ตัวแปรออกแบบ	ต่ำสุด	สูงสุด	หน่วย
กำลังอัดคอนกรีต	450	550	ksc
ขนาดของเหล็กเสริมอัดแรง	11.1	12.7	mm
จำนวนเหล็กเสริมอัดแรง	2	30	nos
ความลึกของคาน (h)	20	180	cm
ขนาดเหล็กดัด SD30	12	16	mm

ตารางที่ 8 ราคาวัสดุและค่าแรงงาน (ไม่รวมงานไม้แบบ)

คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอก)			
กำลังอัด f_c' (ksc)	ราคาวัสดุ	ค่าแรงงาน	หน่วย
450	2,350.00	330.00	Baht / m ³
500	2,470.00	330.00	Baht / m ³
550	2,620.00	330.00	Baht / m ³
ราคาเหล็กเสริมและค่าแรง			
เหล็กดัด SD30	23.00	2.00	Baht / kg
เหล็กเสริมอัดแรง 1860	32.00	8.00	Baht / kg

4.2 สมการเป้าหมาย

การออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบตันที่เหมาะสมและราคาต่ำสุด โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดรวมราคาวัสดุและค่าแรงงาน ตามสมการ

$$F = \text{Min}[\Sigma \cdot (V_C \cdot V_C + W_T \cdot C_T + W_S \cdot C_S)] \quad (17)$$

โดยที่ 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

5. ตัวอย่างและผลการทดสอบ

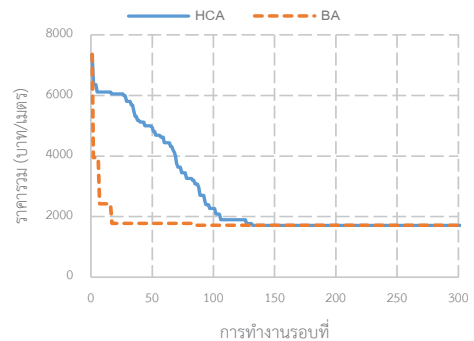
งานวิจัยนี้ทดสอบกับสามตัวอย่าง โดยออกแบบคานตัวในเท่านั้น (ตารางที่ 9) กำหนดใช้ จำนวนรอบการทำงานสูงสุด 1,800 รอบ การทดสอบซ้ำ 300 ครั้ง และสุ่มตัวอย่างมา 30 ครั้ง เพื่อหาความเสถียรของรอบการทำงาน จากนั้นทดสอบทางสถิติกำหนดใช้ t-test [18] โดยสุ่มมา 10 ครั้ง จากที่สุ่มตัวอย่างมา 30 ครั้ง และวัดความต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของรอบลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของทั้งสองกลุ่มตัวอย่าง (HCA และ BA) ค่าเฉลี่ยของรอบลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม ซึ่งสมมติฐานหลัก คือ $H_0: \mu_1 \leq \mu_2$ และมีสมมติฐานรอง $H_1: \mu_1 > \mu_2$ เมื่อ μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของรอบลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของกลุ่มตัวอย่าง HCA และ μ_2 คือ ค่าเฉลี่ยของรอบลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของกลุ่มตัวอย่าง BA ส่วนการวัดประสิทธิภาพความเร็วของอัลกอริทึมใช้การนับรอบในการสร้างคำตอบแทนการจับเวลา เนื่องจากไม่ขึ้นกับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมอื่นที่อาจทำงานอยู่เบื้องหลังระบบปฏิบัติการ ซึ่งทั้งสองอัลกอริทึมยังใช้ข้อกำหนด และเงื่อนไขออกแบบเหมือนกัน เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักได้ปลอดภัย และมีราคาค่าก่อสร้างรวมที่ประหยัดที่สุด

ตารางที่ 9 ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

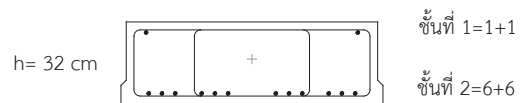
ตัวอย่าง ทดสอบ	น้ำหนักบรรทุกคงที่ ตายตัว W_{im} (kg /m)	ความยาว ช่วงพาด L (m)
1	900	8.0
2	900	10.0
3	900	12.0

5.1 ตัวอย่างทดสอบที่ 1

ผลการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (ภาพที่ 11) พบว่า สมการเป้าหมายมีราคารวมเท่ากับ 1,714.69 บาทต่อเมตร อัลกอริทึมทั้งสอง คือ HCA และ BA ค้นหาเป้าหมายเพื่อนำมาเปรียบเทียบการทำงานรอบที่ต่าง ๆ ลักษณะเส้นกราฟได้บ่งชี้ถึงเส้นทางการค้นหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมของ BA มีประสิทธิภาพความเร็วรอบที่ดีกว่า HCA



ภาพที่ 11 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม
ของตัวอย่างทดสอบที่ 1



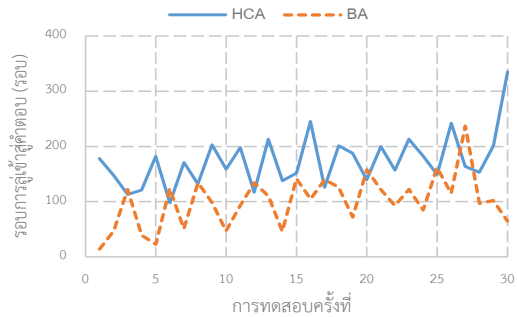
ภาพที่ 12 การเสริมเหล็กในคานของตัวอย่างทดสอบที่ 1

ตารางที่ 10 แสดงผลการออกแบบของคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม ด้วยอัลกอริทึมทั้งสอง พบว่า BA มีประสิทธิภาพจำนวนรอบลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่า ในรอบคำตอบที่ 85 รอบ และร้อยละความต่างของรอบเท่ากับ 35.61

ตารางที่ 10 ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ HCA และ BA ตัวอย่างทดสอบที่ 1

อัลกอริทึม	HCA	BA
f'_c (ksc)	500	500
f_y (ksc)	3,000	3,000
f_{pu} (ksc)	18,600	18,600
ขนาดความลึก h (cm)	32	32
โมเมนต์ความเฉื่อยคาน I_g (cm ⁴)	259,413	259,413
โมเมนต์ดัดปลาย M_u (T-m)	42.76	42.76
กำลังต้านทานโมเมนต์ M_n (T-m)	51.81	51.81
แรงเฉือนปลาย V_u (T)	23.97	23.97
กำลังต้านทานแรงเฉือน V_n (T)	35.64	35.64
ดัชนีเหล็กเสริม ω_p	0.1522	0.1522
ร้อยละของการเสื่อมลดแรงอัด	19.53	19.53
ตรวจสอบการโก่งหรือแอ่นตัว ($\Delta \leq 10$ mm) ขณะใช้งานเนื่องจาก		
น้ำหนักรวมของรบบบรรทุก (L/800)	-6.44	-6.44
น้ำหนักบรรทุกคงที่ในระยะยาว	+7.00	+7.00
จำนวนสวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 1	2- ϕ 12.7	2- ϕ 12.7
จำนวนสวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 2	12- ϕ 12.7	12- ϕ 12.7
เหล็กดัดตั้ง 2 ขา ที่ปลายคาน	2 DB16	2 DB16
เหล็กดัดตั้ง 4 ขา ตลอดแนวกาน	2DB12 @ 40	2DB12 @ 40
ราคารวม (บาทต่อเมตร)	1,714.69	1,714.69
รอบค่าตอบ (รอบ)	132	85
ร้อยละความต่างของรอบ	35.61	

ผลการทดสอบซ้ำ 300 ครั้ง และสุ่มตัวอย่างมา 30 ครั้งของอัลกอริทึมทั้งสองของตัวอย่างทดสอบที่ 1 (ภาพที่ 13) พบว่า BA ค้นหาคำตอบที่เหมาะสมเร็วกว่า HCA เท่ากับ 21 ครั้ง รอบเฉลี่ยเท่ากับ 100.83 รอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 47.35 การสุ่มเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมร้อยละความต่างรอบเฉลี่ยเท่ากับ 42.05



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้งของตัวอย่างทดสอบที่ 1

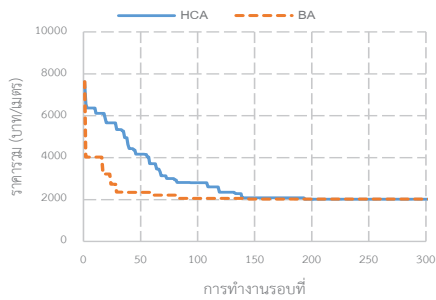
ตารางที่ 11 ผลการทดสอบซ้ำ 300 ครั้งและสุ่มตัวอย่างมา 30 ครั้งของ HCA และ BA สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1

อัลกอริทึม	HCA	BA
จำนวนรอบเฉลี่ย (รอบ)	174.00	100.83
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	48.23	47.35
ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย	42.05	

ผลการออกแบบที่เหมาะสมของทั้งสองอัลกอริทึม (ตารางที่ 11) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน BA และ HCA มีค่าใกล้เคียงกัน และจำนวนรอบการทำงานมีความเสถียรของการกระจายข้อมูลเกาะกลุ่มกันดี

5.2 ตัวอย่างทดสอบที่ 2

ผลการสุ่มเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างทดสอบที่ 2 (ภาพที่ 14) พบว่า สมการเป้าหมายมีราคารวมเท่ากับ 2,019.17 บาทต่อเมตร โดยใช้อัลกอริทึมทั้งสอง คือ HCA และ BA ได้ค้นหาเป้าหมายเพื่อนำมาเปรียบเทียบการทำงานรอบที่ต่าง ๆ ลักษณะเส้นกราฟได้บ่งชี้ถึงเส้นทางการค้นหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมของ BA มีประสิทธิภาพความเร็วรอบที่ดีกว่า HCA

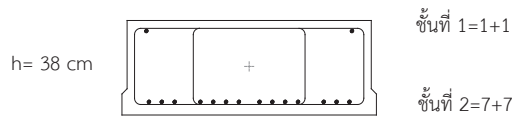


ภาพที่ 14 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม
ของตัวอย่างทดสอบที่ 2

ตารางที่ 12 แสดงผลการออกแบบของคานสะพาน
คอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม ด้วยอัลกอริทึม คือ HCA
และ BA พบว่า BA มีประสิทธิภาพจำนวนรอบลู่เข้าหา
คำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่า ในจำนวนรอบคำตอบที่
145 รอบ และร้อยละความต่างของรอบเท่ากับ 25.26

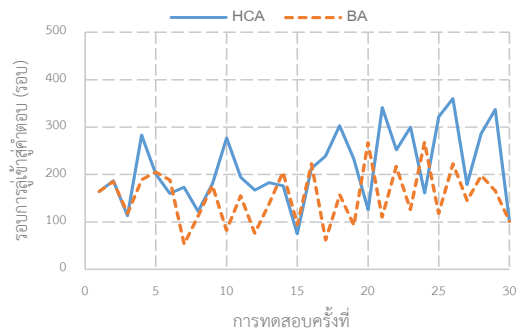
ตารางที่ 12 ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ HCA
และ BA ตัวอย่างทดสอบที่ 2

อัลกอริทึม	HCA	BA
f'_c (ksc)	550	550
f_y (ksc)	3,000	3,000
f_{pu} (ksc)	18,600	18,600
ขนาดความลึก h (cm)	38	38
โมเมนต์ความเฉื่อยคาน I_g (cm ⁴)	434,403	434,403
โมเมนต์ดัดประลัย M_u (T-m)	65.34	65.34
กำลังต้านทานโมเมนต์ M_n (T-m)	74.52	74.52
แรงเฉือนประลัย V_u (T)	26.16	26.16
กำลังต้านทานแรงเฉือน V_n (T)	44.15	44.15
ดัชนีเหล็กเสริม ω_p	0.1347	0.1347
ร้อยละของการเสื่อมลงแรงอัด	19.09	19.09
ตรวจสอบการโก่งหรือแอ่นตัว ($\Delta s \leq 12.5$ mm) ขณะใช้งาน เนื่องจาก		
น้ำหนักจรของรถบรรทุก (L/800)	-10.63	-10.63
น้ำหนักบรรทุกคงที่ในระยะยาว	+7.00	+7.00
จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 1	2- ϕ 12.7	2- ϕ 12.7
จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 2	14- ϕ 12.7	14- ϕ 12.7
เหล็กถูกตั้ง 2 ขา ที่ปลายคาน	3 DB16	3 DB16
เหล็กถูกตั้ง 4 ขา ตลอดแนวกาน	2DB12 @ 40	2DB12 @ 40
ราคารวม (บาทต่อเมตร)	2,019.17	2,019.17
รอบคำตอบ (รอบ)	194	145
ร้อยละความต่างของรอบ	25.26	



ภาพที่ 15 การเสริมเหล็กในคาน
ของตัวอย่างทดสอบที่ 2

ผลการทดสอบซ้ำ 300 ครั้ง และลู่ตัวอย่างมา
30 ครั้ง ของทั้งสองอัลกอริทึมของตัวอย่างทดสอบ
ที่ 2 (ภาพที่ 16) พบว่า BA สามารถค้นหาคำตอบที่
เหมาะสมเร็วกว่า HCA เท่ากับ 21 ครั้ง มีรอบเฉลี่ย
เท่ากับ 153.80 รอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ
58.11 และรอบการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม ร้อยละ
ความต่างรอบเฉลี่ยเท่ากับ 28.02



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบ
ที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้ง

ของตัวอย่างทดสอบที่ 2

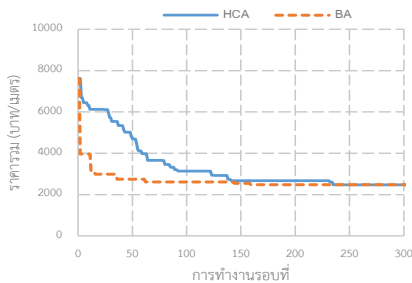
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบซ้ำ 300 ครั้ง และ
ลู่ตัวอย่างมา 30 ครั้งของ HCA และ BA
สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 2

อัลกอริทึม	HCA	BA
จำนวนรอบเฉลี่ย (รอบ)	213.67	153.80
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	77.08	58.11
ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย	28.02	

ผลการออกแบบที่เหมาะสมของทั้งสองอัลกอริทึม
(ตารางที่ 13) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน BA และ
HCA มีค่าใกล้เคียงกัน และจำนวนรอบการทำงานมี
ความเสถียรของการกระจายข้อมูลเกาะกลุ่มกันดี

5.3 ตัวอย่างทดสอบที่ 3

ผลการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างทดสอบที่ 3 (ภาพที่ 17) พบว่า สมการเป้าหมายมีราคา รวมเท่ากับ 2,474.17 บาทต่อเมตร โดยใช้อัลกอริทึม ทั้งสอง คือ HCA และ BA ได้ค้นหาเป้าหมายเพื่อนำ มาเปรียบเทียบการทำงานรอบที่ต่าง ๆ ลักษณะเส้น กราฟได้บ่งชี้ถึงเส้นทางการค้นหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม ของ BA มีประสิทธิภาพความเร็วรอบที่ดีกว่า HCA



ภาพที่ 17 การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสม ของตัวอย่างทดสอบที่ 3

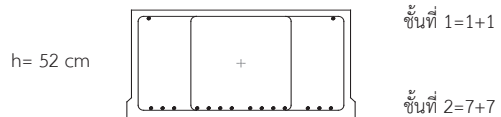
ตารางที่ 14 แสดงผลการออกแบบของคานสะพาน คอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึม คือ HCA และ BA พบว่า BA มีประสิทธิภาพจำนวนรอบลู่เข้าหา ค่าตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่า ในจำนวนรอบค่าตอบที่ 159 รอบ และร้อยละความต่างของรอบเท่ากับ 32.34

ตารางที่ 14 ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ HCA และ BA ตัวอย่างทดสอบที่ 3

อัลกอริทึม	HCA	BA
f'_c (ksc)	550	550
f_y (ksc)	3,000	3,000
f_{pu} (ksc)	18,600	18,600
ขนาดความลึก h (cm)	52	52
โมเมนต์ความเฉื่อยคาน I_g (cm ⁴)	1,113,147	1,113,147
โมเมนต์ดัดประลัย M_u (T-m)	97.90	97.90
กำลังต้านทานโมเมนต์ M_n (T-m)	110.21	110.21
แรงเฉือนประลัย V_u (T)	31.44	31.44
กำลังต้านทานแรงเฉือน V_n (T)	63.45	63.45
ดัชนีเหล็กเสริม ω_p	0.0963	0.0963
ร้อยละของการเสื่อมลดแรงอัด	16.82	16.82

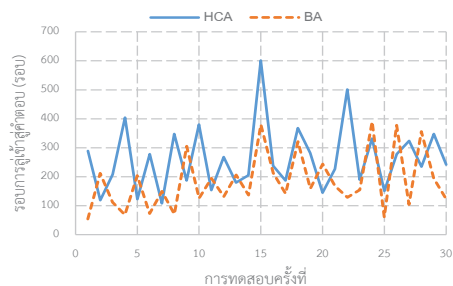
ตารางที่ 14 ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ HCA และ BA ตัวอย่างทดสอบที่ 3 (ต่อ)

อัลกอริทึม	HCA	BA
ตรวจสอบการโก่งหรือแอ่นตัว ($\Delta \leq -15$ mm) ขณะใช้งาน เนื่องจาก		
น้ำหนักจรของรถบรรทุก (L/800)	-8.93	-8.93
น้ำหนักบรรทุกคงที่ในระยะยาว	+7.00	+7.00
จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 1	2- ϕ 12.7	2- ϕ 12.7
จำนวนลวดเกลียวอัดแรงชั้นที่ 2	14- ϕ 12.7	14- ϕ 12.7
เหล็กดัดตั้ง 2 ขา ที่ปลายคาน	3 DB16	3 DB16
เหล็กดัดตั้ง 4 ขา ตลอดแนวน	2DB12 @ 40	2DB12 @ 40
ราคารวม (บาทต่อเมตร)	2,474.17	2,474.17
รอบค่าตอบ (รอบ)	235	159
ร้อยละความต่างของรอบ	32.34	



ภาพที่ 18 การเสริมเหล็กในคานของตัวอย่างทดสอบที่ 3

ผลการทดสอบซ้ำ 300 ครั้ง และสุ่มตัวอย่างมา 30 ครั้งของทั้งสองอัลกอริทึมของตัวอย่างทดสอบที่ 3 (ภาพ ที่ 19) พบว่า BA สามารถค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมเร็ว กว่า HCA เท่ากับ 19 ครั้ง มีรอบเฉลี่ยเท่ากับ 185.50 รอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 99.87 และรอบการ ลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสม ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย เท่ากับ 29.56



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบ ที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้ง ของตัวอย่างทดสอบที่ 3

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบซ้ำ 300 ครั้ง และสุ่มตัวอย่างมา 30 ครั้งของ HCA และ BA สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 3

อัลกอริทึม	HCA	BA
จำนวนรอบเฉลี่ย (รอบ)	263.33	185.50
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	113.86	99.87
ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย	29.56	

ผลการออกแบบที่เหมาะสมของทั้งสองอัลกอริทึม (ตารางที่ 15) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน BA และ HCA มีค่าใกล้เคียงกัน และจำนวนรอบการทำงาน มีความเสถียรของการกระจายข้อมูลเกาะกลุ่มกันดี

การเทียบผลการทดสอบทางสถิติ t-test [16] ของรอบการทำงานเฉลี่ยกลุ่มตัวอย่าง ทั้งสองอัลกอริทึม เมื่อทำการสุ่มตัวอย่างทดสอบ 10 ครั้งจากจำนวนสมาชิก สุ่มมา 30 ครั้ง จากการผลทดสอบซ้ำ 300 ครั้ง (ตารางที่ 16) พบว่า เป็นการปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับ สมมติฐานรอง H_1 ในทั้งสามตัวอย่างทดสอบ แสดง ค่าเฉลี่ยของรอบลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมกับ กลุ่มตัวอย่าง BA มีค่าน้อยกว่า HCA ที่ระดับ ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 16 ผลทดสอบทางสถิติรอบการทำงานเฉลี่ย เมื่อสุ่มมา 10 ครั้ง จากผลทดสอบสุ่มมา 30 ครั้ง ทั้งสองอัลกอริทึม

ผลทดสอบทางสถิติ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3	
	HCA	BA	HCA	BA	HCA	BA
ค่าเฉลี่ย	174.0	100.8	213.7	153.8	263.3	185.5
ค่าต่ำสุด	98	14	75	53	108	54
ค่าสูงสุด	335	237	360	268	601	390
ค่าเบี่ยงเบน	48.23	47.35	77.08	58.11	113.8	99.87
ค่าวิกฤติ	1.73		1.73		1.73	
T-test	2.41		2.41		2.30	
ผลทางสถิติ	ปฏิเสธ H_0		ปฏิเสธ H_0		ปฏิเสธ H_0	

6. บทสรุป

จากผลทดสอบของการออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสมแบบต้น ด้วย BA และ HCA ในทั้งสามตัวอย่าง พบว่าทั้งสองอัลกอริทึมสามารถค้นพบคำตอบที่ให้ราคาต่ำสุดได้เหมือนกัน

แต่แตกต่างกันของจำนวนรอบในการทำงาน โดย BA มีแนวโน้มลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีในช่วงต้นการทำงาน ส่งผลให้ภาพรวมของ BA มีประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบเร็วกว่า HCA ในทั้งสามตัวอย่าง ดังนี้ ตัวอย่างทดสอบที่ 1 ร้อยละ 35.61 ตัวอย่างทดสอบที่ 2 ร้อยละ 25.26 และตัวอย่างทดสอบที่ 3 ร้อยละ 32.34 ส่วนความเสถียรของจำนวนรอบการทำงาน ผลการทดสอบซ้ำ 300 ครั้ง และสุ่มตัวอย่างมา 30 ครั้ง พบว่า BA มีจำนวนรอบการทำงานเฉลี่ยที่เร็วกว่า HCA และมีผลต่างของจำนวนรอบ ดังนี้ ตัวอย่างทดสอบที่ 1 ร้อยละ 42.05 ตัวอย่างทดสอบที่ 2 ร้อยละ 28.02 และตัวอย่างทดสอบที่ 3 ร้อยละ 29.56 ทั้งนี้ได้มีการเทียบผลจากการทดสอบทางสถิติ t-test แสดงให้เห็นว่า BA มีรอบการประมวลผลทำงานเฉลี่ยที่น้อยกว่า HCA โดยมีค่าระดับความน่าเชื่อถือร้อยละ 95

อัลกอริทึมทั้งคู่เพียงพอต่อการใช้งานออกแบบคานสะพานคอนกรีตอัดแรงแบบต้น ที่มีความง่ายในการพัฒนาใกล้เคียงกัน และมีความหลากหลายเป็นทางเลือกของผู้ออกแบบที่ยังขาดประสบการณ์สามารถออกแบบได้ โดยเลือกหน้าตัดอัดโน้มตีประหยัดเวลา ลดความผิดพลาด และเป็นข้อมูลทางการศึกษาต้นทุนของราคาก่อสร้างสะพาน แต่ Bisection algorithm มีประสิทธิภาพด้านความเร็วรอบและความเสถียรในการค้นหาตัวแปรในการออกแบบดีกว่า Hill climbing algorithm

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Moothong N (2019). The evolution of the bridge construction by Prestressed concrete technology. In: Department of Science Service. Available via DIALOG.<http://www.siweb1.dss.go.th>journal> 16 May 2020.

- [2] Chorwichian V, Chorwichian V (2017). Prestressed concrete fundamental. In: Reinforced Concrete Design (SDM). (pp. 507-532). Bangkok.
- [3] Akin A, Saka M P (2015). Harmony search algorithm bases optimum detailed design of reinforced concrete plan frames subject to ACI 318-05 provisions. *Computers and Structures*, 147: 79–95.
- [4] Aga A A A, Adam F M (2015). Design Optimization of Reinforced Concrete Frames. *Open Journal of Civil Engineering*, 5: 34–48.
- [5] Tapown A, Cheerarot R (2017). Optimal parameters and performance of artificial bee colony algorithm for minimum cost design of reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 151: 802–820.
- [6] Limkamontip W (2005). Using Genetic Algorithm to Design and Optimize Prestressed Concrete Beam Bridges. M. Eng Thesis, Department of Civil Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand.
- [7] Banluepuech N, Smithakorn W (2019). Optimum Design of Prestressed Concrete Box Girder Bridges using Particle Swarm Optimization. The 24th National Convention on Civil Engineering (NCCE24), Civil Engineer's Contribution to Thailand 4.0+, 10-12 July 2019, Centara Hotel & Convention Centre, Udon Thani.
- [8] Tapown A, Cheerarot R (2558). Optimum Design of Reinforced Concrete Biaxial Bending Rectangular Column using Artificial Bee Colony Algorithm. *Ladkrabang Engineering Journal*, 32: 49–54.
- [9] Tapown A, Lamom A, Cheerarot R (2555). Optimum Design of Reinforced Concrete Rectangular Column using Hill Climbing Algorithm. *Research and development journal of the engineering institute of Thailand*, 23: 28–35.
- [10] Patchotichai S, Jitrapinat N, Lamom A (2561). Optimum design of Axial loaded reinforced concrete Column Using Bisection algorithm. *Ladkrabang Engineering Journal*, 35: 55–56.
- [11] AASHTO (1992). Standard Specifications for Highway Bridge, Fifteen Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., USA.
- [12] The Engineering institute of Thailand, Standard of prestressed concrete building (2553). Strength Design method, E.I.T. Standard 1009-34.
- [13] Vivithkeyoonvong S (2555). Design of Prestressed Concrete. Civil Engineering, Kasetsart University, Bangkok.
- [14] Pearl J (1984). Heuristic: Intelligent search strategies for computer problem solving, Addison-Wesley Publishing Co.
- [15] Esfandiari MJ, Urgessa GS, Sheikholarefin S, Manshadi SHD (2018). Optimum design of 3D reinforced concrete frames using DMPSO Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 115: 149–160.
- [16] Dechaumphai P, Wansophark N (2012). Numerical Method in Engineering. Chulalongkorn University, Bangkok.
- [17] Committee of construction price (2016). Labor account / operation for estimate and calculate price. Available via DIALOG. <http://www.yothathai.com> 2 Aug.2020
- [18] Kanjanasamranwang P (2561). Excel Static Analysis. In: *Statistical Hypothesis* (pp. 145-192). Bangkok