

การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกน อย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง

Optimum Design of Axial Loaded Reinforced Concrete Column using Bisection Algorithm

ศุริยา ปัตติชัย ฐิติวิทย์ จิตราพิเนตร อลงกรณ์ ละม่อม

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนอย่างเหมาะสมด้วยเทคนิคการแบ่งครึ่งช่วงและทดสอบบน Microsoft Visual Basic 6 โดยออกแบบตามมาตรฐานของ วสท. 1007-34 วิธีหน่วยแรงใช้งานในการทดสอบประสิทธิภาพอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงเลือกใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีแรงตามแนวแกนและระยะหุ้มคอนกรีตแตกต่างกันจำนวน 3 ตัวอย่างผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าฮิลไคลมิงอัลกอริทึมประมาณร้อยละ 21 และยังคงมีความง่ายในการพัฒนา

คำสำคัญ : การออกแบบที่เหมาะสม อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง เสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกน

Abstract

An optimum algorithm for computing reinforced concrete column axial loads using a bisection technique was designed and tested using Microsoft Visual Basic 6. It was based on the EIT. Standard 1007-34 working stress design method. The algorithm was tested on three examples with varying axial forces and concrete covering. The bisection algorithm performed 21 percent faster than the hill climbing algorithm and its implementation is simple.

Keywords : Optimum design, Bisection algorithm, Reinforced concrete column

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้วิธีฮิลล์คลimbing มาช่วยแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกันอย่างแพร่หลาย เช่น Esfandiari และคณะ [1] ใช้อัลกอริทึมฝูงอนุภาคผสมวิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (DMPSO) ออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้น Tapo และ Cheerarot [2] ใช้อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (ABC) ออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วน Orivares และ Tomas [3] ได้ปรับปรุงอัลกอริทึมหิ่งห้อย (MFA) เพื่อใช้ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ต่อมา Shahnewaz และคณะ [4] ประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (GA) สำหรับออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กทรงแคบ จากนั้น Akin และ Saka [5] ใช้อัลกอริทึมฮาร์โมนิเซิร์ซ (HS) เพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ต่อมา Aga และ Adam [6] ทดสอบใช้อัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้น Tapao และคณะ [7] ได้นำอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (ABC) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหน้าตัดที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนี้แล้ว Tapao และคณะ [8] ยังได้นำฮิลล์คลimbing อัลกอริทึม (HCA) มาใช้ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งในบรรดาอัลกอริทึมเหล่านี้ HCA มีประสิทธิภาพไม่สูงนัก แต่เป็นอัลกอริทึมที่เรียบง่าย เรียนรู้ได้เร็ว ส่วนเทคนิคการแบ่งครึ่งช่วงเป็นระเบียบวิธีทางตัวเลข (Numerical Method) ที่เข้าใจได้ง่ายและมีการนำไปใช้ในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อหารากของสมการแต่ยังไม่มีการนำมาประยุกต์กับการออกแบบโครงสร้างเสา [9-11]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนออัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Algorithm : BA) ซึ่งเป็นการนำเทคนิค Bisection Method [9-11] ที่ง่ายและมีประสิทธิภาพมาประยุกต์ใช้ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนโดยเปรียบเทียบผลการทดสอบกับฮิลล์คลimbing อัลกอริทึม (Hill Climbing Algorithm : HCA) [8]

2. ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริม

เหล็กของ วสท. 1007-34

2.1 ข้อกำหนดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

วสท. 1007-34 [12] ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงอัดไว้ดังนี้

- 1) ด้านแคบหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 20 ซม. ยกเว้นเสาที่อยู่ระหว่างเสาหลักหรือไม่มีชั้นต่อเนื่อง
- 2) พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมยื่นในเสาต้องไม่น้อยกว่า 0.01 และไม่เกิน 0.08 ของพื้นที่หน้าตัดเสา A_g ตามสมการที่ (1)

$$0.01 \leq \rho_g \leq 0.08 \quad (1)$$

- 3) เหล็กที่ใช้ต้องไม่เล็กกว่า 12 มม. เสาปลอกเกลียวใช้ไม่น้อยกว่า 6 เส้น เสาปลอกเดี่ยวใช้ไม่น้อยกว่า 4 เส้น

- 4) ในเสาคอนกรีตหล่อในที่ ไม่สัมผัสดินหรือไม่ถูกแดดฝน สำหรับเหล็กปลอกเดี่ยวหรือเหล็กปลอกเกลียวกำหนดระยะขั้วมุมต่ำสุด 3.5 ซม.

- 5) เหล็กปลอกเดี่ยวสำหรับองค์อาคารรับแรงอัด ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

- เหล็กปลอก 6 มม. สำหรับเหล็กยื่น 20 มม. หรือเล็กกว่า

- เหล็กปลอก 9 มม. สำหรับเหล็กยื่น 25 – 32 มม.

- เหล็กปลอก 12 มม. สำหรับเหล็กยื่นใหญ่กว่า 32 มม. ขึ้นไป

- 6) ระยะห่างเหล็กปลอกไม่มากกว่าค่าต่อไปนี้

- 16 เท่าของขนาดเหล็กยื่น

- 48 เท่าของขนาดเหล็กปลอก

- ความกว้างหน้าเสาที่เล็กที่สุด

- 7) น้ำหนักที่คำนวณเมื่อไม่มีการลดกำลังเนื่องจากความชะลูดในเสาปลอกเดี่ยวใช้ตามสมการที่ (2)

$$P = 0.85A_g(0.25f'_c + f_s\rho_g) \quad (2)$$

โดยที่ f'_c คือกำลังอัดของคอนกรีต f_s คือหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมในแนวตั้งของเสา ใช้เท่ากับ $0.4f_y$ แต่ต้องไม่เกิน 2,100 กก./ซม.² และ ρ_g คืออัตราส่วนเนื้อที่เหล็กเสริมตามแนวตั้งต่อเนื้อที่ทั้งหมด (A_{st} / A_g)

3. วิธีแบ่งครึ่งช่วง(Bisection Method)

ระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง [9-11] คือกำหนดขอบเขตของการแทนค่า x น้อยสุด (x_{min}) และมากที่สุด (x_{max}) แล้วบีบช่วง

ระหว่างสองค่านี้ให้แคบลงด้วยการหาค่าแบ่งครึ่งช่วงทีละครึ่งไปเรื่อยๆ แล้วนำค่าไปแทนค่าในฟังก์ชันจนกว่าจะได้ค่าศูนย์ตามขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่า $x_{\min}$ และ $x_{\max}$
2. คำนวณพารามิเตอร์โดยการแบ่งครึ่งช่วง

$$\text{โดยที่ } x_{\text{mid}} = \left(\frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \right)$$

3. คำนวณค่าต่อไปน้เพื่อค้นหาคำตอบของรากสมการที่อยู่บนช่วงที่กำหนด

(3.1) ถ้า $f(x_{\min}) \times f(x_{\text{mid}}) < 0$, คำตอบของรากสมการจะอยู่จากกึ่งกลางลงมาหาค่า $x_{\min}$ 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

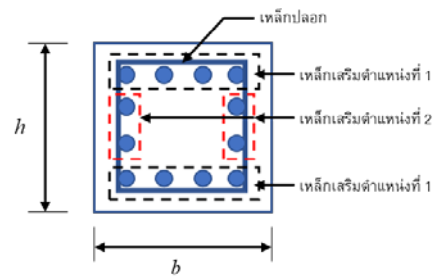
$$\text{โดย } \varepsilon = \left| \frac{x_{\text{mid}}^{\text{new}} - x_{\text{mid}}^{\text{old}}}{x_{\text{mid}}^{\text{new}}} \right| \times 100\%$$

ถ้า $\varepsilon \leq \varepsilon_s$ หยุด ทำซ้ำ ถ้า $\varepsilon > \varepsilon_s$ ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่ง $\varepsilon \leq \varepsilon_s$ จึงหยุดทำซ้ำ

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 ขอบเขตการทำงาน

โปรแกรมที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้พัฒนาด้วย Microsoft Visual Basic 6 และทดสอบบน Windows 10 ในเครื่องที่ใช้ CPU i7 - 6700HQ โดยตารางที่ 1 แสดงถึงขอบเขตการทำงานของโปรแกรมกำหนดขนาดหน้าตัดเสาขนาดกว้างสูงสุด ($b_{\max}$) 80 ซม. และลึกสูงสุด ($h_{\max}$) 80 ซม. ปรับลดค่าที่ละ 5 ซม. จนถึงเสาขนาดกว้างต่ำสุด ($b_{\min}$) 20 ซม. และลึกต่ำสุด ($h_{\min}$) 20 ซม. กำลังอัดคอนกรีตที่ปรับได้มี 180, 210, 240, 280, 320 และ 350 กก./ชม.² เหล็กปลอกใช้ชั้นคุณภาพ SR24 ขนาด 6, 9 และ 12 มม. สำหรับเหล็กยื่นใช้ชั้นคุณภาพ SD30 และ SD40 ขนาด 12, 16, 20, 25, 28 และ 32 มม. การเสริมเหล็กกรอบหน้าตัดเสาจะมีลักษณะตามรูปที่ 1 โดยเหล็กเสริมตำแหน่งที่ 1 คือด้านบนและล่าง ตำแหน่งที่ 2 คือด้านซ้ายและขวาของหน้าตัด เหล็กปลอกรัดรอบ 1 เส้น และในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบเฉพาะกรณีเสาสั้นปลอกเดียวรับแรงตามแนวแกนเท่านั้น



รูปที่ 1 รูปแบบการเสริมเหล็กในหน้าตัดเสา

ตารางที่ 1 ขอบเขตการใช้งานของโปรแกรม

ตัวแปรออกแบบ	ต่ำสุด	สูงสุด	หน่วย
กำลังอัดคอนกรีต	180	350	กก./ชม. ²
กำลังของเหล็กเสริม	3,000	4,000	กก./ชม. ²
ด้านแคบของเสา (b)	20	80	ซม.
ด้านลึกของเสา (h)	20	80	ซม.
ขนาดของเหล็กยื่น	12	32	มม.
เหล็กปลอก SR24	6	12	มม.
จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 1	2	10	เส้น/ด้าน
จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 2	0	10	เส้น/ด้าน

งานวิจัยนี้กำหนดใช้ราคาวัสดุคอนกรีตผสมเสร็จ ราคาเหล็กเสริมของพาณิชย์จังหวัดมหาสารคามประจำเดือนกันยายน ปี พ.ศ. 2560 และใช้ค่าแรงงานจากบัญชีค่าแรง/ค่าดำเนินการสำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2559 [13] ดังแสดงได้ตามตารางที่ 2 สำหรับค่าวัสดุและค่าแรงงานนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามเหมาะสมของราคาในท้องถิ่นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่พิจารณางานไม้แบบมาคิดราคารวมด้วย

ตารางที่ 2 ราคาวัสดุและค่าแรงงาน (ไม่รวมงานไม้แบบ)

คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอก)			
กำลังอัด (f'c)	ราคาวัสดุ	ค่าแรงงาน	หน่วย
180	1,944.00	485.00	บาท/ม. ³
210	1,983.00	485.00	บาท/ม. ³
240	2,027.00	485.00	บาท/ม. ³
280	2,066.00	485.00	บาท/ม. ³
320	2,149.00	485.00	บาท/ม. ³
350	2,197.00	485.00	บาท/ม. ³
ราคาเหล็กเสริมและค่าแรง			
เหล็กปลอก SR24	22.00	4.00	บาท/กก.
เหล็กยื่น SD30	22.00	3.30	บาท/กก.
เหล็กยื่น SD40	24.00	3.30	บาท/กก.

4.2 สมการเป้าหมาย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายคือการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนที่มีขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมและราคาที่ต่ำสุด ดังนั้น สมการที่เป็นสมการเป้าหมายจึงเป็นสมการที่รวมราคาวัสดุและค่าแรงงาน ตามสมการที่ (3)

$$F = \text{Min} \sum (V_C C_C + W_S C_S) \quad (3)$$

เมื่อ F คือ ราคารวมของโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก V_C คือ ปริมาตรของคอนกรีต C_C คือ ราคารวมวัสดุและค่าแรงงานคอนกรีต W_S คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม คือ C_S ราคารวมเหล็กเสริมและค่าแรงงาน

4.3 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมวิธีแบ่งครึ่งช่วง

ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมวิธีแบ่งครึ่งช่วงตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2 มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. กำหนดขนาดหน้าตัดเสาสูงสุดจากความกว้าง ($b_{\max}$) ความลึก ($h_{\max}$) และขนาดหน้าตัดเสาต่ำสุดจากความกว้าง ($b_{\min}$) ความลึก ($h_{\min}$) และสมมติราคาของหน้าตัดเสากลางที่สูงมากเพื่อเริ่มการทำงาน รวมถึงตั้งให้หน้าตัดเสาที่ดีที่สุดครั้งแรกเท่ากับหน้าตัดเสาสูงสุด
2. คำนวณความกว้างกึ่งกลาง (b_{mid}) และความลึกกึ่งกลาง (h_{mid}) โดยการแบ่งครึ่งความกว้างและความลึกเสา ระหว่างหน้าตัดเสาต่ำสุดและหน้าตัดเสาสูงสุด ซึ่งสามารถนำไปหาขนาดหน้าตัดเสากลางได้

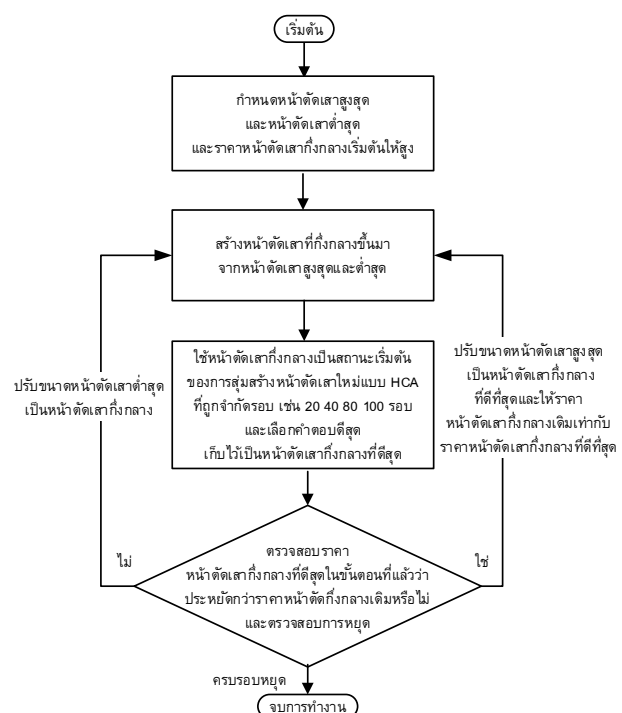
$$\text{โดย } b_{\text{mid}} = \left(\frac{b_{\max} + b_{\min}}{2} \right), \quad h_{\text{mid}} = \left(\frac{h_{\max} + h_{\min}}{2} \right)$$

3. ทำการสุ่มความกว้างและความลึกเสาที่ใกล้เคียงกับความกว้างกึ่งกลางและความลึกกึ่งกลางที่คำนวณได้ เพื่อสร้างหน้าตัดเสาและรูปแบบการเสริมเหล็กใหม่ จากนั้นตรวจสอบหน้าตัดที่สร้างขึ้นว่าสามารถรับแรงได้ และประหยัดกว่าหน้าตัดหน้าตัดเสาที่ดีที่สุดหรือไม่ หากดีกว่าให้บันทึกหน้าตัดที่ดีที่สุดไว้ ส่วนนี้คล้ายการทำงานของอัลกอริทึมพันเขาแต่ทำการกำหนดรอบสูงสุดในการทำงานไม่มาก เช่น 20 รอบการทำงาน และค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อมีการทำงานในรอบถัดไป เช่น 40 60 80 100 เป็นต้น

4. เทียบราคาของหน้าตัดเสากลางเดิมกับราคาของหน้าตัดเสาที่ดีที่สุดที่ได้จากการหาในขั้นตอนที่ 3 หากหน้า

ตัดเสาที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 มีราคาถูกกว่า กำหนดให้ ความกว้างเสาสูงสุดและความลึกเสาสูงสุดเท่ากับความกว้างและความลึกของเสาที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 และกำหนดราคาหน้าตัดเสากลางให้เท่ากับราคาหน้าตัดเสาที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 หากไม่ใช้ให้ทำการกำหนดค่าความกว้างเสาต่ำสุดและความลึกเสาต่ำสุดเท่ากับความกว้างและความลึกเสาที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 แทน แล้วกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2

5. หยุดการทำงานเมื่อครบรอบตามที่กำหนดไว้ ซึ่งในการทดสอบนี้กำหนดไว้ที่ 1,800 รอบ



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธีแบ่งครึ่งช่วง

5. ตัวอย่างและผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ทดสอบกับ 3 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 3 โดย 2 ตัวอย่างแรกมาจากการงานวิจัย [7] และตัวอย่างที่ 3 เพิ่มแรงตามแนวแกนขึ้น โดยกำหนดรอบการทำงานสูงสุด 1,800 รอบ และทำการทดสอบซ้ำจำนวน 30 ครั้ง โดยให้โปรแกรมสุ่มเลือกใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตกำลังรับแรงดึงเหล็กเสริม ขนาดหน้าตัดเสา ขนาดและจำนวนเหล็กยื่นตำแหน่งที่ 1 ขนาดและจำนวนเหล็กยื่นตำแหน่งที่ 2 และขนาดเหล็กปลอก สำหรับการทดสอบทาง

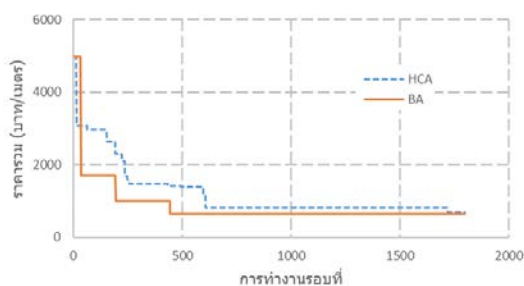
สถิติกำหนดใช้ t-test วัดความต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของรอบการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมกลุ่มตัวอย่าง HCA และค่าเฉลี่ยของรอบการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมกลุ่มตัวอย่าง BA ซึ่งสมมติฐานหลักคือ $H_0: \mu_1 \leq \mu_2$ และมีสมมติฐานรอง $H_1: \mu_1 > \mu_2$ เมื่อ μ_1 คือค่าเฉลี่ยของรอบการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมกลุ่มตัวอย่าง HCA และ μ_2 คือค่าเฉลี่ยของรอบการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมกลุ่มตัวอย่าง BA

ตารางที่ 3 ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	แรงตามแนวแกน (กก.)	ระยะหุ้ม (ซม.)
1	95,000	3.5
2	125,000	5.0
3	250,000	6.5

5.1 ตัวอย่างทดสอบที่ 1

ผลการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมตัวอย่างที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า HCA กราฟค่อยๆ ลดลงมีลักษณะแบบขั้นบันได เนื่องจากเป็นการวิธีลู่ปรับหน้าตัดที่แตกต่างจากเดิมเล็กน้อย ส่วน BA กราฟจะมีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเปลี่ยนเป็นลักษณะขั้นบันไดเล็กน้อยในช่วงกลาง เนื่องจาก BA เป็นการปรับขนาดหน้าตัดด้วยวิธีแบ่งครึ่งช่วงจึงค้นหามาตรฐานที่เหมาะสมได้เร็วกว่า โดยค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มประชากรตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 658.86 บาท/เมตร



รูปที่ 3 การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสม สำหรับตัวอย่างที่ 1

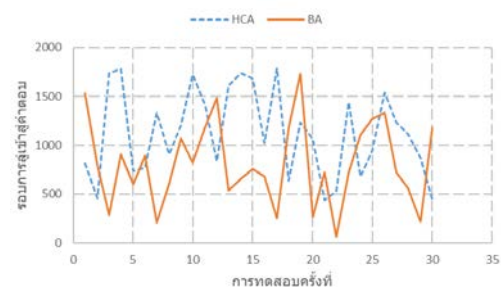
ผลการออกแบบที่เหมาะสมแสดงที่ในตารางที่ 4 พบว่า BA สามารถออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนได้ โดยมีค่าตอบที่เหมาะสมเหมือนกันกับ HCA แต่เมื่อเทียบกันในเรื่องรอบการทำงานพบว่า BA มีจำนวน

รอบการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่ทำได้เร็วกว่าจำนวน 881 รอบ โดยรอบการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมมีค่าแตกต่างกันร้อยละ 51.22

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ BA และ HCA สำหรับตัวอย่างที่ 1

อัลกอริทึม	BA	HCA
f_c (กก./ซม. ²)	350	350
f_y (กก./ซม. ²)	3,000	3,000
ขนาดหน้าตัดเสา b:h (ซม.)	30 :35	30 :35
เหล็กตำแหน่งที่1	4 – DB 20	4 – DB 20
เหล็กตำแหน่งที่2	4 – DB 12	4 – DB 12
เหล็กปลอก	RB6 @ 25ซม.	RB6 @ 25ซม.
ราคารวม (บาท/ม.)	658.86	658.86
รอบค่าตอบ (รอบ)	839	1,720
ร้อยละความต่างของรอบ	51.22	

ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้งของทั้งสองอัลกอริทึมสำหรับตัวอย่างที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า BA สามารถค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่าจำนวน 20 ครั้ง และมีรอบการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยเท่ากับ 813.37 รอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 428.78 ซึ่งรอบการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยในทั้งสองอัลกอริทึมมีค่าแตกต่างกันร้อยละ 27.72 ดังแสดงในตารางที่ 5



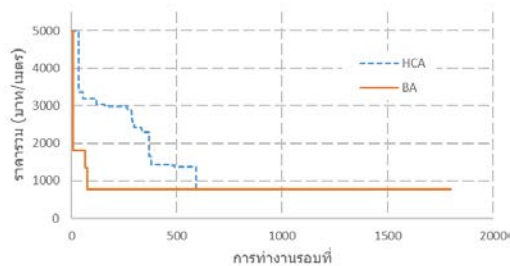
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้ง สำหรับตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้งของ BA และ HCA สำหรับตัวอย่างที่ 1

อัลกอริทึม	BA	HCA
จำนวนรอบเฉลี่ย (รอบ)	813.37	1,125.30
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	428.78	446.13
ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย	27.72	

5.2 ตัวอย่างทดสอบที่ 2

ผลการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมตัวอย่างที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า BA เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่า HCA เมื่อเริ่มทำงานไปเล็กน้อย เนื่องจากการปรับขนาดหน้าตัดด้วยการแบ่งครึ่งช่วงทำให้กราฟลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มประชากรในตัวอย่างที่ 2 นี้ มีค่าเท่ากับ 785.43 บาท/เมตร



รูปที่ 5 การเข้าสู่หาค่าตอบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 2

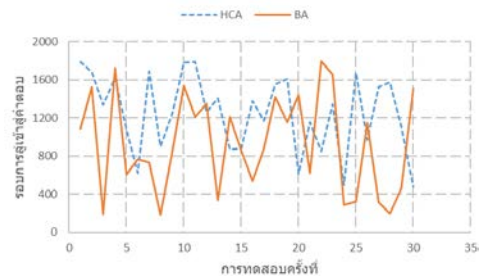
สำหรับผลการออกแบบที่เหมาะสมตามตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า BA สามารถออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนได้โดยมีค่าตอบที่เหมาะสมเหมือนกับ HCA แต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องรอบการทำงานพบว่า BA เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่ทำได้เร็วกว่าจำนวน 517 รอบ โดยมีรอบการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมมีค่าแตกต่างกันร้อยละ 87.33

ตารางที่ 6 ผลการออกแบบที่เหมาะสมของที่สุดของ BA และ HCA สำหรับตัวอย่างที่ 2

อัลกอริทึม	BA	HCA
f_c (กก./ซม. ²)	350	350
f_y (กก./ซม. ²)	4,000	4,000
ขนาดหน้าตัดเสา b:h (ซม.)	35 : 40	35 : 40
เหล็กตำแหน่งที่ 1	4 – DB 20	4 – DB 20
เหล็กตำแหน่งที่ 2	4 – DB 12	4 – DB 12
เหล็กปลอก	RB6 @ 25 ซม.	RB6 @ 25 ซม.
ราคารวม (บาท/ม.)	785.43	785.43
รอบคำตอบ (รอบ)	75	592
ร้อยละความต่างของรอบ	87.33	

ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้งของทั้งสองอัลกอริทึมสำหรับตัวอย่างที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า BA สามารถค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่าจำนวน 20 ครั้ง และมี

รอบการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยเท่ากับ 930.67 รอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 518.46 ซึ่งมีรอบการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยแตกต่างกันร้อยละ 25.48 ดังแสดงในตารางที่ 7



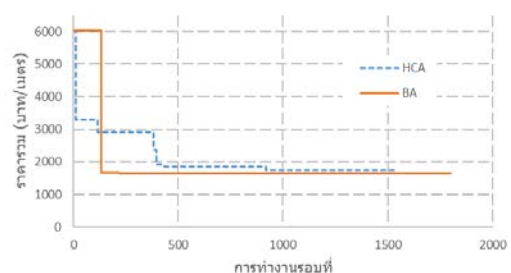
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้ง สำหรับตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้งของ BA และ HCA สำหรับตัวอย่างที่ 2

อัลกอริทึม	BA	HCA
จำนวนรอบเฉลี่ย (รอบ)	930.67	1,248.83
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	518.46	404.30
ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย	25.48	

5.3 ตัวอย่างทดสอบที่ 3

ผลการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมตัวอย่างที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า BA ในช่วงแรกกราฟจะมีลักษณะคงที่และลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการปรับขนาดหน้าตัดด้วยวิธีแบ่งครึ่งช่วง ซึ่งต่างจาก HCA ที่กราฟค่อยๆ ลดลงในลักษณะเป็นขั้นบันได เนื่องจาก HCA ใช้วิธีสุ่มปรับหน้าตัดต่างจากเดิมเล็กน้อย โดยค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มประชากรในตัวอย่างที่ 3 มีค่าเท่ากับ 1,655.23 บาท/เมตร



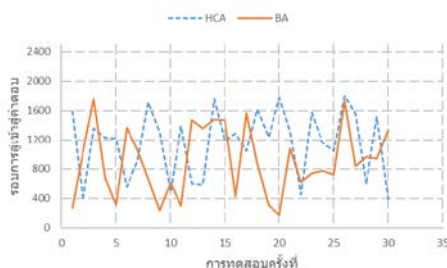
รูปที่ 7 การเข้าสู่หาค่าตอบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 3

สำหรับผลการออกแบบที่เหมาะสมในทั้งสองอัลกอริทึมตามตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่า BA สามารถออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนได้ โดยมีคำตอบที่เหมาะสมเหมือนกันกับ HCA แต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องรอบการทำงานพบว่า BA มีจำนวนรอบการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่ทำได้เร็วกว่าจำนวน 1,314 รอบ โดยรอบการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมมีค่าแตกต่างกันร้อยละ 85.71

ตารางที่ 8 ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของ BA และ HCA สำหรับตัวอย่างที่ 3

อัลกอริทึม	BA	HCA
f'_c (กก./ชม. ²)	350	350
f_y (กก./ชม. ²)	4,000	4,000
ขนาดหน้าตัดเสา b:h (ชม.)	45 : 60	45 : 60
เหล็กตำแหน่งที่ 1	4 – DB 32	4 – DB 32
เหล็กตำแหน่งที่ 2	6 – DB 12	6 – DB 12
เหล็กปลอก	RB9 @ 40 ซม.	RB9 @ 40 ซม.
ราคารวม (บาท/ม.)	1,655.23	1,655.23
รอบคำตอบ (รอบ)	219	1,533
ร้อยละความต่างของรอบ	85.71	

ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้งของทั้งสองอัลกอริทึมสำหรับตัวอย่างที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า BA สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่าจำนวน 17 ครั้ง โดยที่อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงมีรอบการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยเท่ากับ 904.60 รอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 476.17 และรอบการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยในทั้งสองอัลกอริทึมมีค่าแตกต่างกันร้อยละ 21.65 ดังแสดงในตารางที่ 9



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้ง สำหรับตัวอย่างที่ 3

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้งของ BA และ HCA สำหรับตัวอย่างที่ 3

อัลกอริทึม	BA	HCA
จำนวนรอบเฉลี่ย (รอบ)	904.60	1,154.53
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	476.17	457.32
ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย	21.65	

นอกจากนี้ผลการทดสอบทางสถิติ t-test ของรอบการทำงานเฉลี่ยกลุ่มตัวอย่างทั้งสองอัลกอริทึมเมื่อทำการสุ่มตัวอย่างทดสอบจำนวน 10 ครั้งจากจำนวนประชากรทั้งหมด 30 ครั้งในทั้งสองอัลกอริทึม ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 10 พบว่าเป็นการปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และยอมรับสมมติฐานรอง H_1 ในทั้งสามตัวอย่างที่ทำการทดสอบ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของรอบการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของกลุ่มตัวอย่าง BA มีค่าที่น้อยกว่า HCA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 10 ผลทดสอบทางสถิติรอบการทำงานเฉลี่ยเมื่อสุ่มมา 10 ครั้ง จากจำนวนการทดสอบ 30 ครั้งทั้งสองวิธี

ผลทดสอบทางสถิติ	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2		ตัวอย่างที่ 3	
	BA	HCA	BA	HCA	BA	HCA
ค่าเฉลี่ย	768	1,209	662	1,282	786	1,167
ค่าต่ำสุด	63	458	185	611	265	704
ค่าสูงสุด	1,534	1,785	1,213	1,793	1,446	1,732
ค่าเบี่ยงเบน	480	491	367	363	413	298
ค่าวิกฤติ	1.73		1.73		1.73	
T-test	2.03		3.80		2.37	
ผลทางสถิติ	ปฏิเสธ H_0		ปฏิเสธ H_0		ปฏิเสธ H_0	

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลทดสอบในการประยุกต์ใช้ BA สำหรับออกแบบเสา คอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนพบว่า BA สามารถออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนได้ และให้ผลการออกแบบที่เหมาะสมไม่แตกต่างกันกับ HCA ในทั้งสามตัวอย่างที่ทำการทดสอบ แต่สำหรับรอบการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั้น BA มีรอบการทำงานที่เร็วกว่าร้อยละ 51.22, 87.33 และ 85.71

ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทดสอบซ้ำจำนวน 30 ครั้ง พบว่ารอบการทำงานเฉลี่ยของกลุ่มประชากร BA มีรอบการทำงานที่เร็วกว่า HCA ร้อยละ 27.72, 25.48 และ 21.65 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลจากการทดสอบทางสถิติ t-test ยังแสดงให้เห็นว่า BA มีรอบการทำงานเฉลี่ยที่น้อยกว่า HCA ในทั้งสามตัวอย่าง ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากผลการวิจัยนี้สรุปได้ว่า BA มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า HCA โดยเฉพาะช่วงต้นการทำงาน อย่างไรก็ตามในช่วงกลางและปลายของการทำงานนั้น ขั้นตอนการทำงานของ BA จะมีพฤติกรรมคล้าย HCA ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานไม่ต่างกัน ดังนั้นควรหาอัลกอริทึมอื่นเสริมในอนาคตเพื่อพัฒนาให้ช่วงกลางและปลายของรอบการทำงานมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. J. Esfandiari, G. S. Urgessa, S. Sheikholarefin, S. H. D. Manshadi, "Optimum design of 3D reinforced concrete frames using DMPSO algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 115, pp.149–160, 2018.
- [2] A. Tapao and R. Cheerarot, "Optimal parameters and performance of artificial bee colony algorithm for minimum cost design of reinforced concrete frames," *Engineering Structures*, vol.151, pp.802–820, 2017.
- [3] G. S.-Olivares and A. Tomas, "Improvements in meta-heuristic algorithms for minimum cost design of reinforced concrete rectangular sections under compression and biaxial bending," *Engineering Structures*, vol.130, pp.162–179, 2017.
- [4] M. Shahnewaz, R. Machial, M. S. Alam, A. Rteil, "Optimized shear design equation for slender concrete beams reinforced with FRP bars and stirrups using Genetic Algorithm and reliability analysis," *Engineering Structures*, vol.107, pp.151–165, 2016.
- [5] A. Akin and M. P. Saka, "Harmony search algorithm bases optimum detailed design of reinforced concrete plan frames subject to ACI 318-05 provisions," *Computers and Structures*, vol.147, pp.79–95, 2015.
- [6] A. A. A. Aga and F. M. Adam, "Design Optimization of Reinforced Concrete Frames," *Open Journal of Civil Engineering*, vol.5, pp.34–48, 2015.
- [7] A. Tapao and R. Cheerarot, "Optimum Design of Reinforced Concrete Biaxial Bending Rectangular Column using Artificial Bee Colony Algorithm," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol.32, No.3, pp.49–54, September, 2558.
- [8] A. Tapao, A. Lamom, R. Cheerarot, "Optimum Design of Reinforced Concrete Rectangular Column using Hill Climbing Algorithm," *Research and development journal of the engineering institute of thailand*, vol.23, No.2, pp.28–35, June, 2555.
- [9] A. Ersöz and M. Kurban, (2013 August). "Bisection Method and Algorithm for Solving The Electrical Circuits,"[Online].Available:https://www.researchgate.net/publication/259849595_Bisection_Method_and_A_lgorithm_for_Solving_The_Electrical_Circuit[Accessed: June. 29, 2018].
- [10] S. C. Chapra and R. P. Canale, "Numerical Methods for Engineers," 7th ed. New York : McGraw-Hill Education, pp.127–135, 2015.
- [11] P. Dechaumphai and N. Wansophark, "Numerical Methods in Engineering," Chulalongkorn University Press, pp.35-38, 2012.
- [12] The Engineering institute of Thailand, Standard of reinforced concrete building, "Working Stress Design method," (EIT. Standard 1007-34), 2014.
- [13] Committee of construction price, Labor account / operation for estimate and calculate price (revised edition) year 2016, Bangkok in Thailand, 2016.