

การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าอย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึม

Optimum Design of Reinforced Concrete Rectangular Column using Hill Climbing Algorithm

อศนัย ทาภา, อลงกรณ์ ละม่อม และเรืองฤทธิ์ ชีระโรจน์

Assanai Tapawn, Alongkorn Lamom and Raungrut Cheerarot

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

โทร 087-2233355 โทรสาร 043-754316 E-mail: alongkorn_lamom@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับเสา คอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงตามแนวแกน ร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียวและสองทางโดยใช้ฮิลล์ไคลมิง อัลกอริทึม ซึ่งเป็นวิธีการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมโดย จำลองมาจากแนวคิดของนักปีนเขาในการมองหาเส้นทางที่สั้น ที่สุดเพื่อไปให้ถึงยอดเขา โดยพัฒนาขั้นตอนหาคำตอบที่ เหมาะสมด้วยโปรแกรม Microsoft visual basic 6 เพื่อออกแบบ เสาตามมาตรฐานการออกแบบของ วสท.1008-38 วิถีกำลังและ ใช้ฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึมในการหาหน้าตัดที่เหมาะสม จากผล การศึกษาพบว่า ฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ ในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า รับแรงอัดร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียวและโมเมนต์ดัดสองทาง ได้ โดยผลของคำตอบที่ได้คือ กำลังของคอนกรีตและเหล็ก เสริม ขนาดหน้าตัดเสา ขนาดเหล็กเสริม ปริมาณเหล็กเสริมที่ เหมาะสมและมีราคาต่ำที่สุด

Abstract

This research presents a hill climbing algorithm to optimal design of reinforced concrete rectangular column under uniaxial and biaxial loads. This algorithm is an iterate simulate from the process of the mountaineer to find a short way to the top mountain. Microsoft visual basic 6 is used to develop and design the reinforced concrete columns according to the strength design method of E.I.T. (E.I.T.1008-38), while the hill climbing algorithm is used to determine the optimum section of column. The result showed that the hill climbing algorithm can be applied to design the reinforced concrete uniaxial and biaxial column

for the optimum solution including strength of concrete and steel, column section, bars size, amount of bar, and the lowest cost.

1. บทนำ

การออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมคือ การออกแบบ โครงสร้างให้มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมกับแรงที่กระทำ โดยที่โครงสร้างนั้นยังสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย และผ่านมาตรฐานการออกแบบและมีราคาค่าก่อสร้างที่ต่ำ ที่สุด สำหรับแนวคิดการออกแบบที่เหมาะสมในงาน วิศวกรรมเริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้นตั้งแต่ Goldberg [1] นำ เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm หรือ GA) ที่จำลองมา จากวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยามาใช้ในการ แก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น นอกจาก GA แล้ว ยังมีวิธีการอื่นๆ ที่ถูกนำมาประยุกต์สำหรับการออกแบบโครงสร้างอย่าง เหมาะสมเช่น ซิมูเลเตดแอนนิลลิ่งอัลกอริทึม (Simulated annealing algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการที่จำลองมาจาก กระบวนการหลอมโลหะแล้วปล่อยให้โลหะเย็นลงอย่างช้าๆ จนโลหะแข็งตัว [2] ฮาร์โมนีซีร์ชอัลกอริทึม (Harmony search algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการที่จำลองมาจากแนวคิดการ ปรับเสียงดนตรีให้มีความไพเราะก่อนการแสดงของนักดนตรี [3] และ พาร์ติเคิลสวอร์ม (Particle swarm) ซึ่งเป็นแนวคิดที่ จำลองมาจากการเคลื่อนที่ของฝูงปลาและฝูงนก [4] โดยในแต่ละวิธีจะมีขั้นตอนการทำงานที่ยากและง่ายต่างกัน และการ เลือกใช้จะขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ประยุกต์ใช้ด้วย

จากหลายวิธีที่นำมาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบ โครงสร้างอย่างเหมาะสม [2-5] ฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึม (Hill climbing algorithm) เป็นวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมอีกวิธี หนึ่งที่มีขั้นตอนการทำงานที่ไม่ซับซ้อน แต่ยังไม่เป็นที่นิยม

เนื่องจากยังไม่เป็นที่รู้จักกันมากนัก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอ การประยุกต์ใช้ซิลิโคนมิงอัลกอร์ทิมสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้มาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท.1008-38 [6] วิธีกำลัง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดหน้าตัดเสาและปริมาณเหล็กเสริมที่มีราคาประหยัดที่สุด และสามารถรับแรงแบกทานได้อย่างปลอดภัย

2. ทฤษฎีและการออกแบบเสาต้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.1 เสาต้นรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียว

โครงสร้างเสาต้นคอนกรีตเสริมเหล็กมีหน้าที่รับน้ำหนักตามแนวแกนเป็นหลักและรับโมเมนต์ดัดที่บริเวณจุดเชื่อมต่อของคานและแผ่นพื้น โดยพิจารณาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเป็นแรงตามแนวแกน (P) ที่กระทำเอียงศูนย์กลางเป็นระยะ e จนเกิดเป็นโมเมนต์ (M) รอบแกนสะเทินดังรูปที่ 1(ก)

การวิเคราะห์แรงภายในหน้าตัดเสา โดยทั่วไปจะสมมติให้ค่าความเครียดสูงสุดที่ขอบนอกสุดด้านรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.003 และกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายหน่วยแรงอัดของคอนกรีตเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หลังจากนั้น คำนวณกำลังรับแรงตามแนวแกนด้วยสมการที่ (1) และโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดเสาคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$Pn = Cc + Cs - Ts \quad (1)$$

$$Mn = Cc \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + Cs \left(\frac{h}{2} - d' \right) + Ts \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (2)$$

เมื่อ Pn คือ กำลังรับแรงตามแนวแกนสูงสุดของหน้าตัดเสา

Cc คือ แรงอัดในคอนกรีต

Cs คือ แรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัด

Ts คือ แรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึง

Mn คือ กำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดเสา

h คือ ความหนาทั้งหมดขององค์อาคาร

d' คือ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กบริเวณเหล็กรับแรงดึง

d คือ ระยะจากขอบบนสุดด้านรับแรงอัดไปยัง

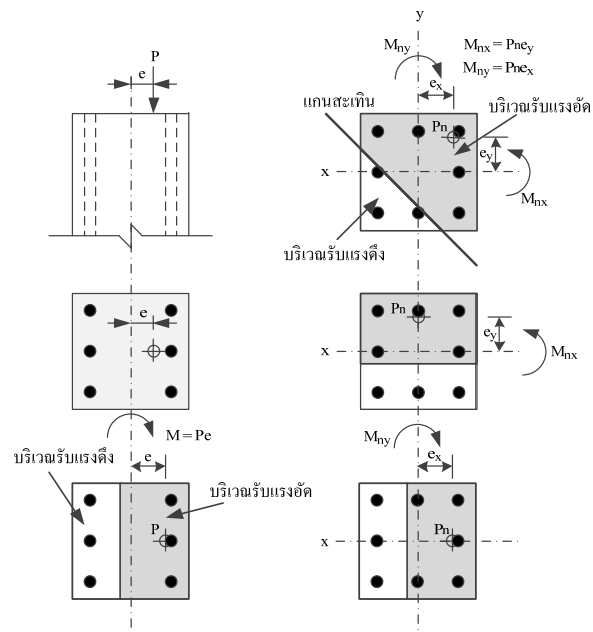
จุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง

a คือ ความลึกของหน่วยแรงรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ $c\beta$ โดยที่ค่า c คือ ระยะจากขอบที่มีความเครียดอัดสูงสุดถึงแกนสะเทินในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนสะเทินนั้น และ β คือ ค่าตัวคูณประกอบตามมาตรฐานการออกแบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.65

$$\beta = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'c - 280}{70} \right) \leq 0.65 \quad (3)$$

2.2 เสาต้นรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทาง

สำหรับเสาต้นรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดสองทางจะพิจารณาให้หน้าตัดเสามีแรงตามแนวแกนกระทำเอียงศูนย์กลางเป็นระยะ e_x กับแนวแกน x และกระทำเอียงศูนย์กลางเป็นระยะ e_y กับแนวแกน y จนเกิดเป็นโมเมนต์ M_{nx} รอบแกน x และโมเมนต์ M_{ny} รอบแกน y ดังรูปที่ 1(ข) สำหรับการวิเคราะห์แรงภายในหน้าตัดเสาจะใช้หลักการแบ่งแรงที่กระทำออกเป็นสองแกนคือ แรงกระทำเอียงศูนย์กลางกับแกน y เป็นระยะ e_y จนเกิดโมเมนต์ M_{nx} รอบแกน x และแรงที่กระทำเอียงศูนย์กลางกับแกน x เป็นระยะ e_x จนเกิดโมเมนต์ M_{ny} รอบแกน y หลังจากนั้น นำสมการที่ (1) และ (2) คำนวณกำลังรับแรงแบกทานเช่นเดียวกับการออกแบบเสาต้นรับโมเมนต์ดัดทางเดียว



ก) วิเคราะห์หน้าตัดแกนเดียว ข) วิเคราะห์หน้าตัดสองแกน
รูปที่ 1 หน้าตัดเสาเมื่อรับแรงตามแนวแกนร่วมกับ โมเมนต์ดัด
ทางเดียวและสองทาง

จากนั้น กำลังรับแรงแบกทานที่เกิดจากการวิเคราะห์หน้าตัดจะนำไปเปรียบเทียบกับน้ำหนักปลอดภัยจากแรงภายนอกที่กระทำ ซึ่งผลการออกแบบที่ได้จะเป็นที่น่าพอใจก็ต่อเมื่อกำลังรับแรงแบกทานที่เกิดจากการวิเคราะห์หน้าตัดเสามีค่ามากกว่าน้ำหนักปลอดภัยจากแรงภายนอกที่กระทำ

2.3 วิธีเส้นชั้นของแรง

Bresler [7] ได้เสนอวิธีเส้นชั้นของแรง (Load contour method) สำหรับประมาณกำลังรับโมเมนต์คดสองทางดังสมการที่ (4) เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบกำลังรับแรงคดสองทางของหน้าตัดเสา โดยที่ผลของสมการนี้จะเป็นที่น่าพอใจก็ต่อเมื่ออัตราส่วนของโมเมนต์ที่กระทำและกำลังรับโมเมนต์ของหน้าตัดเสาทั้งสองแกนรวมกันแล้วมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 และผลการออกแบบจะมีความประหยัดมากขึ้นเมื่อผลของสมการนี้มีค่าใกล้เคียง 1.0 มากที่สุด

$$\left(\frac{M_x}{M_{nx}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_y}{M_{ny}}\right)^\alpha \leq 1.0 \quad (4)$$

เมื่อ M_x คือ โมเมนต์คดที่กระทำรอบแกน x

M_{nx} คือ โมเมนต์คดที่หน้าตัดเสาสามารถรับได้รอบแกน x

M_y คือ โมเมนต์คดที่กระทำรอบแกน y

M_{ny} คือ โมเมนต์คดที่หน้าตัดเสาสามารถรับได้รอบแกน y

ค่า α จะมีค่าเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนของแรงในแนวแกน P_n ที่กระทำและแรงแนวแกนสูงสุด P_0 ของหน้าตัดเสาที่สามารถรับได้ โดยค่า α มีค่าเท่ากับสมการที่ (5) และมียู่ระหว่าง $1.0 < \alpha < 2.0$

$$\alpha = \frac{2}{3} + \frac{5P_n}{3P_0} \quad (5)$$

3. อัลกอริทึมฮัลลอร์ทิม

อัลกอริทึมฮัลลอร์ทิม (HCA) นำเสนอครั้งแรกโดย Pearl [8] ในปี ค.ศ. 1984 ซึ่งเป็นการค้นหาคำตอบที่มีลักษณะคล้ายกับการปีนเขา โดยเป็นที่ทราบกันดีว่า การที่นักปีนเขาจะเดินทางไปสู่ยอดเขาได้ นักปีนเขาจะต้องมองหาตำแหน่งยอดเขา แล้ว

จะต้องเดินทางไปให้ถึงจุดนั้นให้ได้โดยหาเส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อใช้เวลาให้น้อยที่สุดในการไปให้ถึงยอดเขา [9]

โดยอัลกอริทึมนี้เป็นวิธีการหาสถานะเป้าหมายหรือสถานะคำตอบที่ดีที่สุด ที่มีลักษณะการค้นหาคำตอบเชิงฮิวริสติก (Heuristic search) ซึ่งกำลังนิยมใช้ในการแก้ปัญหาในด้านความเหมาะสมหลายๆปัญหา เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่มีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดค่าใดค่าหนึ่ง โดยมีลักษณะการหาคำตอบเชิงกราฟ (Graph search algorithm) [10-11] คล้ายกับการขึ้นเขาหรือลงเขาไปในแนวตั้งตลอด ในการมุ่งสู่เป้าหมายจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการสุ่มค่าในช่วงที่กำหนด [12] โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. สร้างสถานะเริ่มต้น เป็นการสร้างสถานะคำตอบแรกขึ้นด้วยการสุ่มกำหนดตัวแปรต่างๆ ของปัญหาที่กำหนดไว้ เพื่อสร้างเป็นคำตอบแรกก่อนเข้าสู่กระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสม

2. สร้างสถานะใหม่ เป็นการสร้างสถานะคำตอบใหม่ด้วยการปรับเปลี่ยนจากสถานะเดิมเล็กน้อยโดยการปรับค่าเพิ่มหรือลดในขอบเขตการปรับที่กำหนด

3. การตรวจสอบสถานะ เป็นขั้นตอนการเปรียบเทียบสถานะคำตอบระหว่าง 2 สถานะคือ สถานะใหม่และสถานะปัจจุบัน ถ้าหากสถานะใหม่ดีกว่าสถานะปัจจุบัน สถานะใหม่จะแทนที่สถานะปัจจุบันทันที

4. ตรวจสอบกับสถานะเป้าหมาย เป็นการตรวจสอบสถานะของคำตอบกับสมการเป้าหมายที่กำหนดขึ้นในแต่ละปัญหา ถ้าสถานะปัจจุบันเป็นสถานะเป้าหมาย กระบวนการทำงานจะหยุดทันที

5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 จนถึงขั้นตอนที่ 4 จนกว่าจะได้สถานะเป้าหมายหรือเข้าสู่เงื่อนไขการหยุด

4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.1 การพัฒนาโปรแกรม

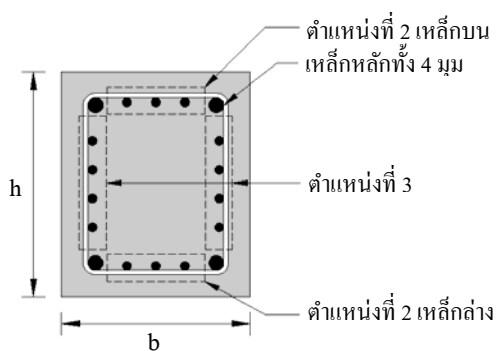
กระบวนการหาค่าความเหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรม Microsoft visual basic 6.0 พัฒนาเป็นโปรแกรมออกแบบเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีขอบเขตการทำงานดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยกำลังอัดของคอนกรีต

(ทรงกระบอก) ที่ใช้กับงานก่อสร้างทั่วไปคือ 210, 240, 280, 300 และ 320 กก./ชม.² โดยสามารถกำหนดเป็นตัวแปรคู่หรือเลือกค่าได้ตามต้องการ ด้านแคบ (b) และด้านลึก (h) ของเสาอยู่ในช่วง 20 -150 ซม. โดยปรับเพิ่มขึ้นทุกๆ 5 ซม.

การเสริมเหล็กจะเสริมโดยรอบหน้าตัดเสาดังรูปที่ 2 ซึ่งมีตำแหน่งที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่ง ประกอบด้วย เหล็กตำแหน่งที่ 1 คือเหล็กเสริมหลักทั้ง 4 มุม มีจำนวนครั้งที่คือ 4 เส้น ตำแหน่งที่ 2 คือเหล็กเสริมตามแนว b ขอบบนและขอบล่าง และตำแหน่งที่ 3 คือเหล็กเสริมตามแนว h ทั้งสองข้าง มีค่าเพิ่มทุกๆ 1 เส้น โดยเหล็กเสริมทุกตำแหน่งที่สามารถเลือกใช้ได้คือ DB12, DB16, DB20, DB25, DB28, DB32, DB36 และ DB40

ตารางที่ 1 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรม

ตัวแปรออกแบบ	ต่ำสุด	สูงสุด	หน่วย
กำลังอัดคอนกรีต (ทรงกระบอก)	180	320	กก./ชม. ²
กำลังของเหล็กเสริม	3,000	4,000	กก./ชม. ²
ด้านแคบของเสา (b)	20	150	ซม.
ด้านลึกของเสา (h)	20	150	ซม.
ขนาดของเหล็กอื่น	12	40	มม.
ขนาดเหล็กปลอก (เหล็กกลม SR24)	6	12	มม.
จำนวนเหล็กเสริมหลัก	4	4	เส้น
จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 2	0	40	เส้น/ด้าน
จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 3	0	40	เส้น/ด้าน



รูปที่ 2 ตำแหน่งการเสริมเหล็กของโปรแกรมที่พัฒนา

ในการหาหน้าตัดที่เหมาะสมจำเป็นต้องกำหนดราคาวัสดุและค่าแรงเพื่อคำนวณหาราคาของโครงสร้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ราคาคอนกรีตผสมเสร็จไม่รวมภาษีของจังหวัดมหาสารคาม ประจำเดือนกรกฎาคมปี พ.ศ. 2554 ราคา

แบบหล่อและเหล็กเสริมจากสำนักงานพาณิชย์จังหวัดกรุงเทพมหานคร เดือนพฤษภาคมปี พ.ศ. 2554 ค่าแรงงานจากบัญชีค่าแรง/ดำเนินการ สำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2551 ของคณะกรรมการกำกับนโยบายราคากลางงานก่อสร้างกรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง [13] โดยได้แสดงในตารางที่ 2 อย่างไรก็ตามราคาเหล่านี้สามารถปรับลดหรือปรับเพิ่มตามราคาวัสดุและค่าแรง ณ เวลานั้นๆ ได้

สำหรับการตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 โดยปริมาณเหล็กเสริมในหน้าตัดเสาดังมีไม่ต่ำกว่าร้อยละ 1 และมีไม่เกินร้อยละ 8 ของพื้นที่หน้าตัดเสาทั้งหมด ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมต้องมีระยะไม่น้อยกว่า 2.54 ซม. ค่ากำลังรับแรงตามแนวแกนประลัยของหน้าตัดเสา (ϕP_n) ต้องมีค่ามากกว่าแรงแนวแกนประลัย (P_u) ที่กระทำและค่าโมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัดเสา (ϕM_n) ต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดประลัย (M_u) ที่กระทำ

ตารางที่ 2 ราคาวัสดุและค่าแรงงาน

คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอก)			
กำลังอัด (f'_c)	ราคาวัสดุ	ค่าแรงงาน	หน่วย
210	1,911	330	บาท/ม. ³
240	1,950	330	บาท/ม. ³
280	2,032	330	บาท/ม. ³
300	2,081	330	บาท/ม. ³
320	2,129	330	บาท/ม. ³
ราคาเหล็กเสริมและค่าแรง			
เหล็กปลอก SR24	20	3	บาท/กก.
เหล็กอื่น SD30	23	2	บาท/กก.
เหล็กอื่น SD40	24	2	บาท/กก.
ราคาแบบหล่อและค่าแรง			
แบบหล่อ	550	103	บาท/ม. ²

4.2 สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายของงานวิจัยนี้ได้แสดงในสมการที่ (6) ซึ่งสมการนี้ทำให้ผลการออกแบบหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีราคาต่ำที่สุด โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อราคาประกอบด้วย คุณสมบัติวัสดุ ขนาดหน้าตัดเสา ปริมาณการเสริมเหล็ก และปริมาณแบบหล่อ

$$F = \text{Min } \Sigma (V_C C_C + A_F C_F + W_S C_S) \quad (6)$$

เมื่อ F คือ ราคาวัสดุรวมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

V_C คือ ปริมาตรของคอนกรีต

C_C คือ ราคาวัสดุและค่าแรงสำหรับงานคอนกรีต

A_F คือ ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต

C_F คือ ราคาแบบหล่อและค่าแรงสำหรับงานหล่อแบบ

W_S คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม

C_S คือ ราคารวมเหล็กเสริมและค่าแรงงาน

4.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนา

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาแสดงในรูปที่ 3 โดยการใช้งานโปรแกรมจะต้องระบุค่ากำลังรับแรงแบกทานระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและเงื่อนไขการหยุดก่อนการใช้งาน ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานหลัก 2 ขั้นตอนคือ การสร้างคำตอบเริ่มต้นและการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม โดยในแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การสร้างคำตอบเริ่มต้น ขั้นตอนนี้จะทำการสุ่มตัวแปรออกแบบทั้งหมดและคำนวณผลการออกแบบ หลังจากนั้นจะตรวจสอบกับเงื่อนไขการออกแบบและกำลังรับแรงแบกทานที่ต้องรับ ซึ่งจะซ้ำจนกว่าจะผ่านเงื่อนไขการออกแบบและสามารถรับแรงแบกทานได้ หลังจากนั้นจะนำผลการออกแบบนี้กำหนดเป็นคำตอบปัจจุบัน

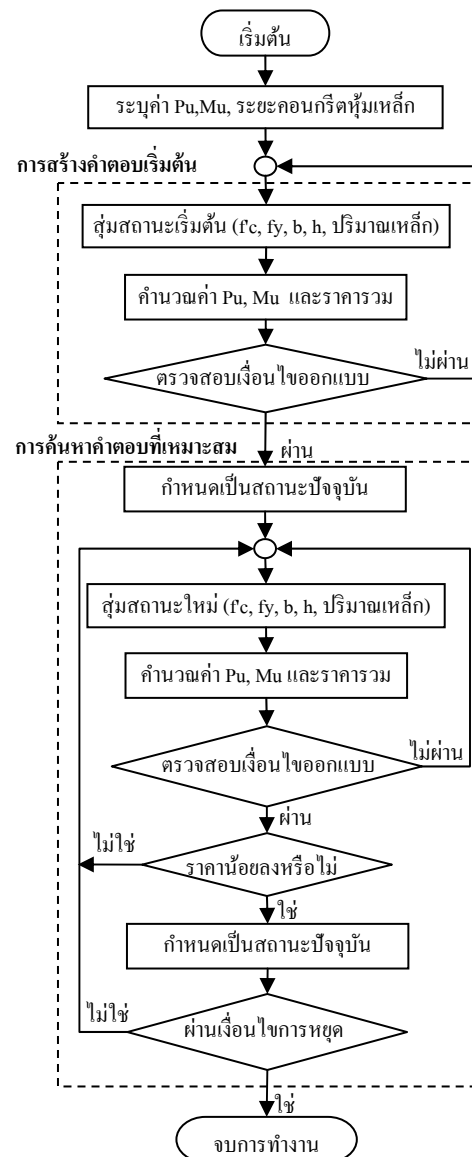
2. การสุ่มสร้างสถานะใหม่ เป็นขั้นตอนการสุ่มปรับจากคำตอบเดิมเล็กน้อยเพื่อให้ได้สถานะคำตอบใหม่ที่ดีกว่า ซึ่งในปัญหานี้เป็นการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของหน้าตัดเสา (กำลังอัดของคอนกรีต กำลังรับแรงของเหล็กเสริม ขนาดหน้าตัดเสาและปริมาณเหล็กเสริม) โดยสุ่มขึ้น 1 ชั้นหรือสุ่มลด 1 ชั้น หลังจากนั้นจะผ่านขั้นตอนการคำนวณกำลังรับแรงแบกทานและราคาแล้วจึงทำการตรวจสอบกับเงื่อนไขการออกแบบ

3. การตรวจสอบด้านราคา เป็นการตรวจสอบผลรวมราคาของคำตอบใหม่ว่ามีค่าน้อยลงกว่าคำตอบเดิมหรือไม่ โดยนำสมการที่ (6) มาใช้ในการพิจารณาผลของคำตอบใหม่ที่ได้ ถ้าหากผลคำตอบใหม่ที่ได้มีราคาที่ต่ำกว่าผลคำตอบเดิมและผ่านเงื่อนไขการออกแบบทุกประการ คำตอบใหม่จะ

แทนที่คำตอบเดิมทันทีแล้วสถานะคำตอบใหม่นี้จะถูกกำหนดเป็นสถานะคำตอบปัจจุบัน

4. การตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด เงื่อนไขหยุดการทำงานของโปรแกรมจะประกอบด้วยเงื่อนไขสองเงื่อนไขคือ การซ้ำของคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนรอบการทำงานสูงสุด

5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 4 จนกว่าจะซ้ำคำตอบที่เหมาะสมที่สุดครบตามที่กำหนดหรือหยุดด้วยจำนวนรอบสูงสุด โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดเงื่อนไขการหยุดด้วยการซ้ำของคำตอบที่เหมาะสม 3 ครั้ง และเพื่อเป็นการป้องกันการทำงานอย่างไม่มีที่สิ้นสุดของโปรแกรมจึงกำหนดให้มีจำนวนรอบสูงสุดไม่เกิน 30,000 รอบ



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม HCA

4.4 ตัวอย่างทดสอบ

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการค้นหาผลการออกแบบที่มีราคาต่ำที่สุดของโปรแกรมที่พัฒนา ในงานวิจัยนี้ แบ่งตัวอย่างทดสอบออกเป็น 2 กรณี สำหรับกรณีที่ 1 เป็นการออกแบบเสาต้นรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดทางเดียวดังตารางที่ 3 ซึ่งนำมาจากงานวิจัยของ Zielinski และคณะ [14] และ Charles และคณะ [15] สำหรับกรณีที่ 2 เป็นการออกแบบเสาต้นรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางดังตารางที่ 4 ซึ่งนำมาจากงานวิจัยของ Rafiq [5]

ตารางที่ 3 ตัวอย่างทดสอบสำหรับเสารับโมเมนต์ดัดทางเดียว

ตัวอย่าง ออกแบบ	d' (ซม.)	f _y (กก./ซม. ²)	f' _c (กก./ซม. ²)	P _n (กก.)	M _n (กก. - ม.)
1	6.5	4,000	255	250,853	45,172
2	7	4,000	306	181,511	36,912
3	7.5	4,000	306	203,945	57,306

ตารางที่ 4 ตัวอย่างทดสอบสำหรับเสารับโมเมนต์ดัดสองทาง

ตัวอย่างออกแบบ	4	5	6	7
f' _c (กก./ซม. ²)	280	280	300	320
f _y (กก./ซม. ²)	4,000	4,000	4,000	4,000
d' (ซม.)	3.5	4	5	6.5
P _n (กก.)	96,840	127,421	407,747	509,684
M _{nx} (กก. - ม.)	9,684	10,601	45,872	216,514
M _{ny} (กก. - ม.)	6,626	4,077	76,453	101,937

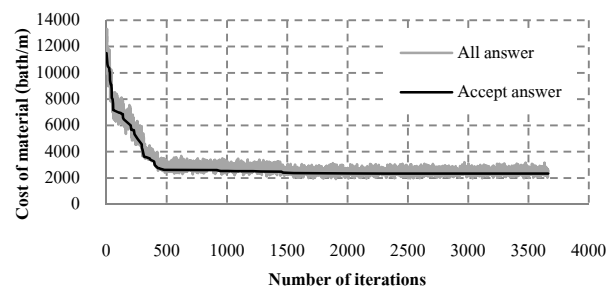
5. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

5.1 เสาต้นรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียว

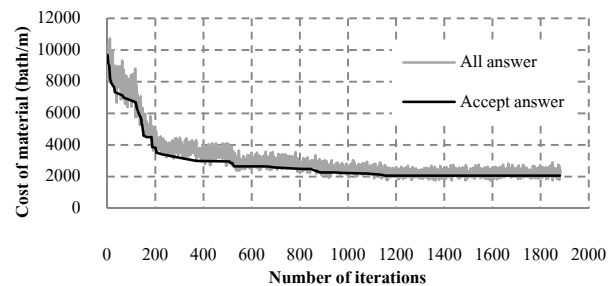
ผลการออกแบบกรณีที่ 1 แสดงในตารางที่ 5 โดยผลการออกแบบของ HCA แสดงให้เห็นแล้วว่า HCA สามารถตัดสินใจเลือกคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมได้เอง ซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยของ Zielinski [14] และ Charles [15] ที่ต้องกำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุก่อนการออกแบบ การเข้าสู่ค่าต่ำสุดตามสมการเป้าหมายแสดงในรูปที่ 4(ก-ค) โดยตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ใช้จำนวนรอบ 3663, 1880 และ 2564 รอบ ตามลำดับ เส้นสีเทาถือผลของราคารวมในทุกรอบการคำนวณ สำหรับเส้นสีดำคือ ผลการออกแบบที่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบ สามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยและมีความประหยัด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ผลการ

ออกแบบจะมีราคาลดลงทุกรอบจนกระทั่งไม่สามารถหาผลของคำตอบที่สามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยและมีความประหยัดมากกว่า สามารถสังเกตได้จาก เส้นกราฟสีดำที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงปลายก่อนหยุดการทำงาน

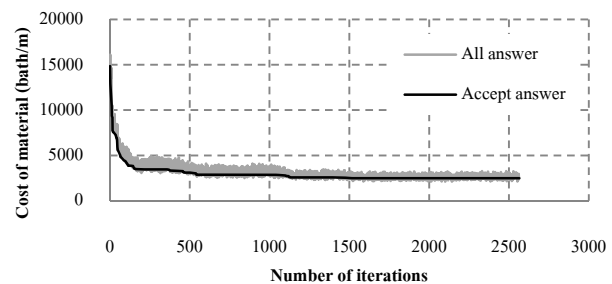
เมื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบของ HCA กับงานวิจัยของ Zielinski [14] พบว่า HCA มีความประหยัดกว่าในทุกตัวอย่างร้อยละ 11.00, 5.32 และ 25.72 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับ Charles [15] พบว่า ตัวอย่างที่ 1 สิ้นเปลืองกว่าร้อยละ 6.57 ตัวอย่างที่ 2 ประหยัดกว่าร้อยละ 2.26 และตัวอย่างที่ 3 สิ้นเปลืองกว่าร้อยละ 0.93 ตามลำดับ โดยจากผลการเปรียบเทียบขนาดของเสาจะเห็นได้ว่า การออกแบบของ HCA ได้พิจารณาอยู่บนพื้นฐานที่สามารถก่อสร้างได้จริง



(ก) ตัวอย่างที่ 1 เสารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียว



(ข) ตัวอย่างที่ 2 เสารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียว



(ค) ตัวอย่างที่ 3 เสารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียว

รูปที่ 4 ลักษณะการเข้าสู่หาค่าต่ำสุดของ HCA ทดสอบกรณีที่ 1

ตารางที่ 5 ผลการออกแบบสำหรับเสาสั้นรับโมเมนต์ทางเดียว

ตัวอย่าง ออกแบบ	ตัวแปรออกแบบ	Zielinski et al.[14]*	Charles et al.[15]*	HCA
1	f'_c (กก./ชม. ²)	255	255	320
	f_y (กก./ชม. ²)	4,000	4,000	3,000
	b (ชม.)	39.57	21.59	35
	h (ชม.)	68.35	74.93	65
	A_s (ชม. ²)	27.48	25.81	22.87
	ρ_s	1.02	1.6	1.01
	ราคา (บาท/ม.)	2,600	2,162	2,314
2	f'_c (กก./ชม. ²)	306	306	320
	f_y (กก./ชม. ²)	4,000	4,000	4,000
	b (ชม.)	31.95	30.48	35
	h (ชม.)	59.35	63.5	55
	A_s (ชม. ²)	25.81	20.26	20.36
	ρ_s	1.36	1.05	1.06
	ราคา (บาท/ม.)	2,180	2,111	2,064
3	f'_c (กก./ชม. ²)	306	306	320
	f_y (กก./ชม. ²)	4,000	4,000	4,000
	b (ชม.)	47.4	30.48	35
	h (ชม.)	49.91	74.93	70
	A_s (ชม. ²)	73.23	25.81	24.88
	ρ_s	3.09	1.13	1.02
	ราคา (บาท/ม.)	3,340	2,458	2,481

* มาตรฐานการออกแบบ ACI 318-99

5.2 เสาสั้นรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทาง

ผลการออกแบบกรณีที่ 2 แสดงในตารางที่ 6 และการเข้าสู่ค่าต่ำสุดตามสมการเป้าหมายมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 4 โดยในตัวอย่างที่ 4 - 7 ใช้จำนวนรอบเท่ากับ 4202, 2398,

2236 และ 2875 รอบ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ HCA กับงานวิจัยของ Rafiq [5] พบว่า HCA เลือกใช้คุณสมบัติวัสดุคอนกรีตสูงกว่า ในตัวอย่างที่ 4, 5 และ 7 ตามลำดับ มีอัตราส่วนพื้นที่เหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดเสา (ρ_s) ที่ต่ำกว่าร้อยละ 0.33, 1.39, 0.94 และ 1.75 ตามลำดับ ขนาดหน้าตัดเสามีขนาดที่ใกล้เคียง Rafiq [5] ในบางตัวอย่าง ในตัวอย่างที่ 4 HCA มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กกว่า 75 ชม.² และตัวอย่างที่ 5 - 7 มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่กว่า 125, 1500 และ 2700 ชม.² ตามลำดับ จึงทำให้ผลการออกแบบที่ได้จาก HCA มีความประหยัดมากกว่าในทุกตัวอย่างร้อยละ 6.82, 9.51, 10.11 และ 7.20 ตามลำดับ โดยผลของความประหยัดอาจมาจากการใช้มาตรฐานออกแบบที่แตกต่างกันด้วย

นอกจากนี้ จากผลการทดสอบ HCA ออกแบบหน้าตัดเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียวและโมเมนต์ดัดสองทาง พบว่า HCA เลือกใช้กำลังวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมที่สูงที่สุดในเกือบทุกตัวอย่างออกแบบ และกำหนดเลือกใช้ขนาดหน้าตัดเสาที่มีปริมาณการเสริมเหล็กใกล้เคียงร้อยละ 1.00 ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า การกำหนดใช้คุณสมบัติวัสดุที่สูงมากจะทำให้ได้ขนาดหน้าตัดเสาที่มีขนาดเล็กลง จึงส่งผลให้ปริมาณเหล็กเสริมและแบบหล่อ่น้อยลงด้วย ดังนั้น ผลการออกแบบสำหรับเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีความประหยัดมากที่สุดเมื่อกำหนดใช้กำลังคอนกรีตและเหล็กเสริมที่เหมาะสม และออกแบบด้วยการกำหนดใช้ปริมาณเหล็กเสริมที่ต่ำที่สุด

ตารางที่ 6 ผลการออกแบบสำหรับเสาสั้นรับ โมเมนต์ดัดสองทาง

ตัวอย่างออกแบบ	4		5		6		7	
วิธีการ	Rafiq [5]*	HCA	Rafiq [5]*	HCA	Rafiq [5]*	HCA	Rafiq [5]*	HCA
f'_c (กก./ชม. ²)	280	320	280	320	300	300	320	320
f_y (กก./ชม. ²)	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
b (ชม.)	30	25	25	25	50	70	55	70
h (ชม.)	40	45	40	45	75	75	110	125
เหล็กเสริมหลัก (ที่มุม)	4 - DB16	4 - DB12	4 - DB20	4 - DB16	4 - DB40	4 - DB20	4 - DB40	4 - DB25
เหล็กบน-ล่าง (ตำแหน่งที่ 2)	-	4 - DB12	4 - DB16	2 - DB16	4 - DB25	2 - DB25	8 - DB32	16 - DB20
เหล็กด้านข้าง (ตำแหน่งที่ 3)	4 - DB16	2 - DB12	2 - DB16	-	4 - DB25 + 2 - DB40	12 - DB20	8 - DB25	8 - DB20
A_s (ชม. ²)	16.08	11.31	24.63	12.06	114.67	60.08	171.97	95.33
ρ_s	1.34	1.01	2.46	1.07	2.08	1.14	2.84	1.09
ราคา (บาท/ม.)	1,525	1,421	1,587	1,436	4,877	4,384	7,152	6,637

*มาตรฐานการออกแบบ BS8110

6. สรุปผล

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้ HCA สำหรับออกแบบเสาต้นคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า รับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียวและรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางพบว่า HCA มีขั้นตอนการทำงานที่ง่าย มีความซับซ้อนที่น้อยและสามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า รับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียวและโมเมนต์ดัดสองทางได้ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า HCA สามารถเลือกคุณสมบัติวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริม ขนาดหน้าตัดเสา ขนาดของเหล็กเสริมและปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสมได้ โดยที่ผู้ออกแบบระบุเพียงแรงที่กระทำและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเท่านั้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] D.E. Goldberg and M.P. Samtani, "Engineering optimization via genetic algorithm", Electronic Computation, ASCE, New York, 1986, pp. 471 – 482.
- [2] H.S. Park and C.W. Sung, "Optimization of steel structures using distributed simulated annealing algorithm on a cluster of personal computers", Computers and Structures, Vol. 80, 2002, pp. 1305-1316.
- [3] M.P. Saka, "Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, 2009, pp. 36-43.
- [4] L.J. Li, Z.B. Huang and F. Liu, "A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables", Computers and Structures, Vol. 87, 2009, pp. 435-443.
- [5] M.Y. Rafiq and C. Southcombe, "Genetic algorithms in optimal design and detailing of reinforced concrete biaxial columns supported by a declarative approach for capacity checking", Computers and Structures, Vol. 69, 1998, pp. 443-457.
- [6] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, "มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง", 2545, กรุงเทพฯ.
- [7] B. Bresler, "Design criteria for reinforced columns under axial load and biaxial bending", ACI Structure Journal, Vol.57, 1960, pp. 481-490.
- [8] J. Pearl, "Heuristic : Intelligent search strategies for computer problem solving", Addison-Wesley Publishing Co., Reading, 1984.
- [9] บุญเจริญ ศิริเนาวกุล, "ปัญญาประดิษฐ์", กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ที่อป, 2550.
- [10] A.W. Johnson and S.H. Jacobson, "On the convergence of generalized hill climbing algorithms", Discrete Applied Mathematics, Vol. 119, 2002, pp. 37-57.
- [11] D.J. Cross, R. Myers and E.R. Hancock, "Convergence of a hill-climbing genetic algorithm for graph matching", Pattern Recognition, Vol. 33, 2000, pp. 1863-1880.
- [12] S.A. Dunn, "The use of genetic algorithms and stochastic hill-climbing in dynamic finite element model identification", Computers & Structures, Vol. 66, 1998, pp. 489-497.
- [13] คณะกรรมการกำกับนโยบายราคากลางงานก่อสร้าง กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง, "บัญชีค่าแรง/ค่าเนิ่นการ สำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2551", กรุงเทพฯ, 2551.
- [14] Z.A. Zielinski, W. Long and M.S. Troitsky, "Designing reinforced concrete short-tied columns using the optimization technique." ACI Structure Journal, Vol. 92, 1995, pp. 619-626.
- [15] V.C. Charles, P. Shahram and H. Hakan, "Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm." Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 1, 2003, pp. 105-115.