

## การออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า รับแรงดัดสองทางด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

อศนัย ทาภา<sup>1</sup> จักรพันธุ์ วงษ์พา<sup>2</sup> อลงกรณ์ ละม่อม<sup>2</sup> และ เรืองรุชดี ชีระโรจน์<sup>3</sup>  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทาง เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวและได้หน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประหยัด สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการวิจัยคือ ราคารวมต่ำสุดของเสาที่ออกแบบซึ่งคำนวณมาจากราคาคอนกรีตผสมเสร็จ ราคาเหล็กเสริม ราคาไม้แบบและค่าแรงงาน โดยเลือกใช้โปรแกรม Microsoft visual basic 6 ในการพัฒนาอัลกอริทึมและขั้นตอนการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลัง สำหรับตัวอย่างทดสอบกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก แรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดทั้งสองแกนที่แตกต่างกันจำนวน 4 ตัวอย่าง จากผลการศึกษาพบว่า อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวสามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางได้ด้วยการกำหนดให้ราคารวมของเสาในสถานะเริ่มต้นเป็นค่าอนุกรมเริ่มต้นในอัลกอริทึม และกำหนดให้อัตราการลดอนุกรมเท่ากับร้อยละ 2 โดยผลที่ได้ทำให้จำนวนรอบและผลการออกแบบมีเสถียรภาพสูงสุด

**คำสำคัญ :** การออกแบบที่เหมาะสม / เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก / อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

\* Corresponding author. E-mail: j.wongpa@gmail.com

<sup>1</sup> ผู้ช่วยวิจัย สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

## Optimum Design of Reinforced Concrete Biaxial Rectangular Column using Simulated Annealing Algorithm

Assanai Tapown<sup>1</sup>, Jakrapan Wongpa<sup>2\*</sup>, Alongkorn Lamom<sup>2</sup>, and Raungrut Cheerarot<sup>3</sup>

Maharakham University, Khamriang, Kantarawichai, Maharakham 44150

### Abstract

This research presents an optimal design of the reinforced concrete rectangular column under axial force and biaxial bending using simulated annealing algorithm to find the optimum parameter of simulated annealing algorithm and the saving cross section. The minimum total cost including the price of concrete, steel, formwork and labor are defined as the objective function in this study. Microsoft visual basic 6 was used to develop a program and to design the reinforced concrete columns according to the strength design method of Engineering Institute of Thailand (E.I.T.1008-38) code. Four samples are provided by varying the covering, axial force and biaxial moment. From the results, it was found that the simulated annealing algorithm was suitable algorithm to design the reinforced concrete biaxial bending column. The total cost was set as the initial temperature for the first state to search the optimum solution at the first period. The step of decreasing temperature of 2% had the effective number of iterations and obtained the stable solution.

**Keywords :** Simulated annealing algorithm / Structure optimization / Biaxial bending column design

---

\* Corresponding author. Email: j.wongpa@gmail.com

<sup>1</sup> Assistant Researcher, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Lecturer, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

## 1. บทนำ

อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว (Simulated annealing algorithm : SA) เป็นวิธีการหนึ่งของระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence : AI) ใช้สำหรับหาค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุดในช่วงใดๆ โดยอาศัยหลักการสุ่มตัวแปรและเลือกเส้นทางด้วยเหตุผล โดย SA มีเสถียรภาพในเรื่องของความแม่นยำ ความรวดเร็ว และมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน SA เป็นที่รู้จักกันมากในเรื่องของการออกแบบที่เหมาะสมมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1991 เริ่มจาก Balling [1] ได้ใช้ SA ออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสม โดยผลจากงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า SA สามารถเลือกวัสดุแทนผู้ออกแบบได้เอง โดยที่ผู้ออกแบบกำหนดเพียงเงื่อนไขการเลือกวัสดุ จึงทำให้ SA เป็นที่รู้จักและถูกประยุกต์ใช้ออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมกับโครงสร้างแบบต่างๆ จนถึงปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่น Ceranic และ คณะ [2] ได้ใช้ SA พัฒนาเป็นโปรแกรมที่สามารถออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสม โดยกำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิที่ต่างกัน ซึ่งจากการวิจัยพบว่า SA สามารถใช้ออกแบบกำแพงกันดินด้วยการเลือกขนาดที่ประหยัดที่สุดโดยที่ผู้ใช้งานกำหนดเฉพาะน้ำหนักที่กระทำ นอกจากนี้ Oguzhan [3] ได้ใช้ SA ออกแบบโครงสร้างขนาดใหญ่รูปทรงพีระมิดที่มีจำนวน 224 ชิ้นส่วน พบว่า SA สามารถแก้ไขปัญหาการออกแบบโครงสร้างที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังมีหลายงานวิจัยที่พัฒนาและปรับปรุง SA ให้มีประสิทธิภาพสำหรับออกแบบโครงสร้างมากยิ่งขึ้น เช่น Hyo และ Chang [4] ประยุกต์ใช้ SA ออกแบบโครงสร้างให้มีน้ำหนักเบาที่สุดโดยปรับปรุง SA ให้สามารถค้นหาคำตอบได้ถึงสองทางพร้อมกัน ทำให้สามารถลดจำนวนรอบและทรัพยากรที่ใช้คำนวณให้น้อยลงได้ อีกทั้งยังให้ผลการออกแบบที่ประหยัดเทียบเท่ากับ SA ดั้งเดิม ต่อมา Lamberti [5] ได้พัฒนา SA ให้มีประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างที่มีความประหยัดมากขึ้นโดยมีชื่อใหม่คือ CMLPSA (Corrected Multi-Level & Multi-Point Simulated Annealing) ซึ่งมีความประหยัดมากกว่า SA ดั้งเดิม นอกจากนี้ Garcia และ คณะ [6] ได้พัฒนา SA ร่วมกับระบบ SIMP (Solid

isotropic material with penalization) เพื่อการออกแบบรูปร่างของโครงสร้างให้มีความเหมาะสมกับน้ำหนักที่กระทำบนโดเมนออกแบบที่กำหนด (Design domain) ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่า ระบบ SA-SIMP ให้ผลของรูปร่างที่มีลักษณะของโครงสร้างที่เด่นชัดมากกว่าการใช้ระบบ SIMP เพียงอย่างเดียว

การออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมคือ การออกแบบโครงสร้างให้มีราคาต่ำสุดที่ต่ำที่สุดโดยที่โครงสร้างนั้นยังสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยและผ่านมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งโดยทั่วไปผู้ออกแบบมักออกแบบด้วยการใช้ประสบการณ์ที่ผ่านมาในการเลือกตัวแปรต่างๆ และจะคำนึงถึงความปลอดภัยก่อนตามหลักการออกแบบที่ระบุไว้ในข้อกำหนด หลังจากนั้น ผู้ออกแบบจะปรับผลการออกแบบด้วยการลดขนาดจากการลองผิดลองถูกซ้ำหลายครั้งจนได้คำตอบที่น่าพอใจ แต่ไม่สามารถกล่าวได้ว่า ผลการออกแบบสุดท้ายมีความประหยัดที่สุด เนื่องจากผู้ออกแบบมักไม่คำนึงถึงราคาที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุในขณะที่ทดลองปรับเปลี่ยนหน้าตัดงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ SA สำหรับออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางที่เหมาะสม ด้วยการออกแบบตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยวิธีกำลัง (ว.ส.ท. 1008-38) [7] ซึ่งพิจารณาออกแบบเฉพาะกรณีของเสาสั้นปลอกเดี่ยว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความรวดเร็ว ปลอดภัยและประหยัดมากที่สุด

## 2. ทฤษฎีคำนวณและออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีหน้าที่รับแรงในแนวตั้งเป็นหลัก และรับโมเมนต์ดัดที่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างคานและแผ่นพื้น ซึ่งในการคำนวณและออกแบบต้องพิจารณาออกแบบให้หน้าตัดเสาสามารถรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดได้ทั้งหมดจึงจะมีความปลอดภัย โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาออกแบบเฉพาะกรณีของเสาสั้นและใช้เหล็กปลอกเดี่ยวเท่านั้น

## 2.1 การวิเคราะห์กำลังรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดทางเดียว

การคำนวณกำลังรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเสา จะต้องพิจารณาแรงภายนอกที่กระทำและกำหนดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดเสาให้มีลักษณะดังรูปที่ 1 จึงจะสามารถประมาณขนาดหน้าตัดเสาและปริมาณการเสริมเหล็กได้ สำหรับการพิจารณาโมเมนต์ที่กระทำกับหน้าตัดเสา ให้พิจารณาแรงตามแนวแกน ( $P_n$ ) กระทำเยื้องศูนย์กลางเป็นระยะ  $e$  กับหน้าตัดเสาจนเกิดเป็นโมเมนต์ ( $M_n$ ) รอบแกนสะเทินดังรูปที่ 2(ก) ในการคำนวณแรงภายในของหน้าตัดเสาเพื่อต้านทานแรงภายนอกที่กระทำ จะอาศัยการวิเคราะห์หน้าตัดเสา

อย่างละเอียด ซึ่งเริ่มต้นด้วยการสมมติให้ค่าความเครียดสูงสุดที่ขอบนอกสุดด้านรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.003 และกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายหน่วยแรงอัดของคอนกรีตเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หลังจากนั้น คำนวณกำลังรับแรงตามแนวแกนด้วยสมการที่ (1) และโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดเสาคำนวณได้จากสมการที่ (2) ซึ่งเป็นการนำแรงภายในของหน้าตัดเสาคำนวณกับระยะที่วัดจากขอบจนถึงจุดศูนย์กลางมวลพลาสติกของหน้าตัด และจากสมการที่ (1) และ (2) เป็นผลการวิเคราะห์แรงภายในของหน้าตัดเสาที่ประกอบด้วย กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากสมการที่ (3) กำลังอัดของเหล็กเสริมจากสมการที่ (4) และกำลังดึงของเหล็กเสริมจากสมการที่ (5)

$$\phi P_n = \phi (C_c + C_s - T_s) \quad (1)$$

$$\phi M_n = \phi \left[ C_c \left( \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) + T_s \left( d - \frac{h}{2} \right) \right] \quad (2)$$

โดยที่  $C_c = 0.85f'_c (c\beta)b \quad (3)$

$$C_s = A'_s(f'_s - 0.85f'_c) \quad (4)$$

$$T_s = A_s f_s \quad (5)$$

เมื่อ  $\phi P_n$  คือ กำลังรับแรงตามแนวแกนสูงสุดของหน้าตัดเสายอมให้

$C_c$  คือ แรงอัดในคอนกรีต

$C_s$  คือ แรงอัดในเหล็กเสริมรับแรงอัด

$T_s$  คือ แรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึง

$f'_c$  คือ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ

$f_s$  คือ หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมรับแรงดึง

$f'_s$  คือ หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมรับแรงอัด

$\phi M_n$  คือ กำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดเสายอมให้

$b$  คือ ด้านแคบขององค์อาคาร

$h$  คือ ความหนาทั้งหมดขององค์อาคาร

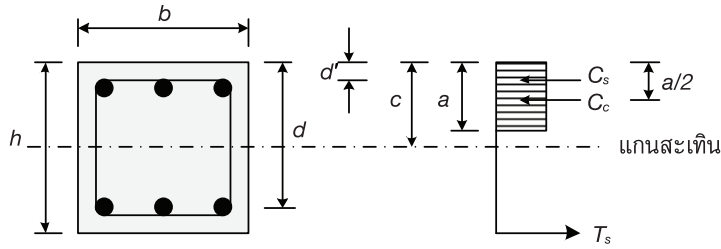
$d'$  คือ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กบริเวณเหล็ก

รับแรงดึง

$d$  คือ ระยะจากขอบบนสุดด้านรับแรงอัดไปยังจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง

$a$  คือ ความลึกของหน่วยแรงรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $c\beta$  โดยที่ค่า  $c$  คือ ระยะจากขอบที่มีความเครียดอัดสูงสุดถึงแกนสะเทินในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนสะเทินนั้น และ  $\beta$  คือ ค่าตัวคูณประกอบตามมาตรฐานการออกแบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.65

$$\beta = 0.85 - 0.05 \left( \frac{f'_c - 280}{70} \right) \leq 0.65 \quad (6)$$

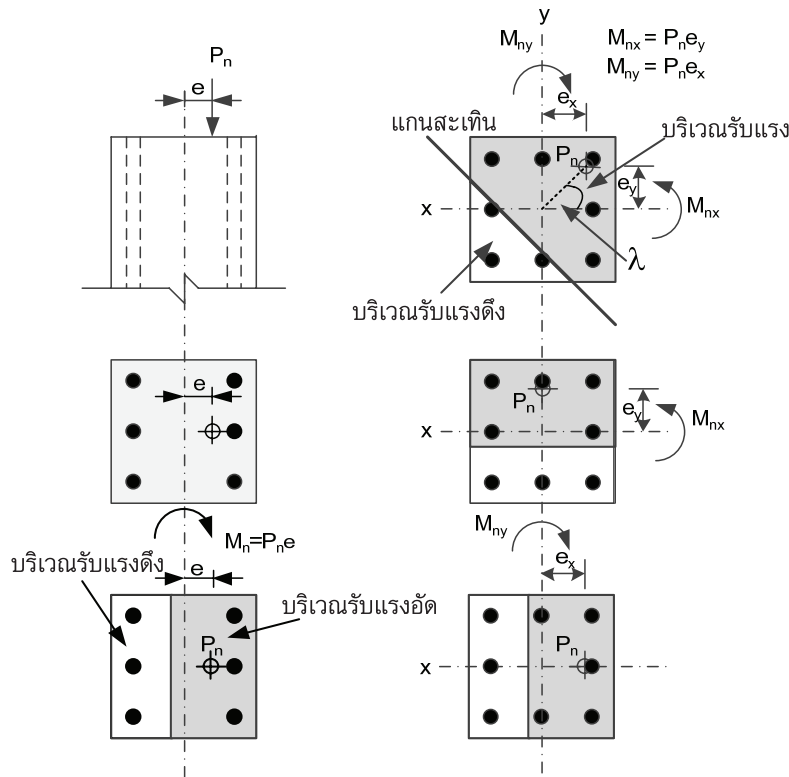


รูปที่ 1 หน่วยแรงภายในหน้าตัดเสาสีเหลี่ยม

**2.2 การวิเคราะห์กำลังรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทาง**

การพิจารณาแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางที่กระทำกับหน้าตัดเสา จะพิจารณาให้หน้าตัดเสามีแรงตามแนวแกนกระทำเอียงศูนย์กลางเป็นระยะ  $e_x$  กับแนวแกน x และกระทำเอียงศูนย์กลางเป็นระยะ  $e_y$  กับแนวแกน y จนเกิดโมเมนต์  $M_{ny}$  รอบแกน x และโมเมนต์  $M_{nx}$  รอบแกน y ดังรูปที่ 2 (ข) สำหรับการวิเคราะห์แรงภายในหน้าตัดเสาจะใช้หลักการวิเคราะห์หน้าตัดที่ละ

แกนแล้วคำนวณกำลังรับน้ำหนักจากสมการที่ (1) และ (2) เช่นเดียวกับการคำนวณเสารับโมเมนต์ดัดทางเดียว ซึ่งจากการคำนวณจะได้กำลังรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์รอบแกน X คือ  $\phi P_{nx}$  และ  $\phi M_{nx}$  กำลังรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์รอบแกน Y คือ  $\phi P_{ny}$  และ  $\phi M_{ny}$  โดยเมื่อเสารับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ทั้งแกน X และแกน Y จะทำให้แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสาอยู่ในรูปแบบ 3 มิติดังรูปที่ 3



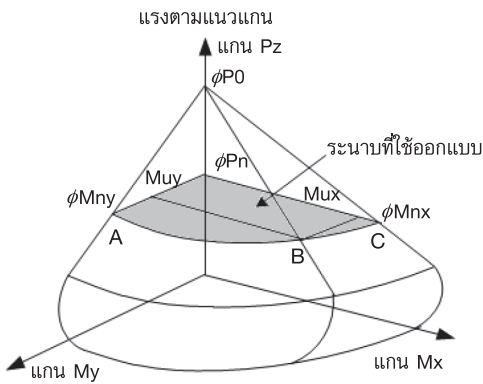
ก) วิเคราะห์หน้าตัดแกนเดียว

ข) วิเคราะห์หน้าตัดสองแกน

รูปที่ 2 การวิเคราะห์หน้าตัดเมื่อรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด

จากรูปที่ 3 การออกแบบจะต้องออกแบบให้แรงที่กระทำ ( $P_u, M_{ux}, M_{uy}$ ) ตกอยู่ภายในแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ทั้งแกน X และแกน Y ( $\phi P_n > P_u, \phi M_{nx} > M_{ux}$  และ  $\phi M_{ny} > M_{uy}$ ) นอกจากนี้ ต้องคำนวณแรงตามแนวแกนของหน้าตัดเสาใหม่ด้วยสมการที่ (7) เพื่อคำนวณ  $\phi P_n$  ที่แท้จริงของหน้าตัดเสา ซึ่งแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสาที่แท้จริงจะอยู่ในระนาบที่ทำมุม  $\lambda$  กับแกน My

$$\frac{1}{\phi P_n} = \frac{1}{\phi P_{nx}} + \frac{1}{\phi P_{ny}} - \frac{1}{\phi P_o} \tag{7}$$



รูปที่ 3 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของเสาเมื่อรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทาง

2.3 วิธีเส้นชั้นของแรง

วิธีเส้นชั้นของแรง (Load contour method) ของ Bresler [8] เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับการตรวจสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดสองทาง ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับการทดลองถึงร้อยละ 3 โดยผลของสมการนี้จะเป็นที่ยอมรับก็ต่อเมื่อคำนวณโดยใช้สมการที่ (8) แล้วต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 นอกจากนี้ ผลการออกแบบมีความประหัดมากขึ้นเมื่อผลคำนวณของสมการนี้มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด

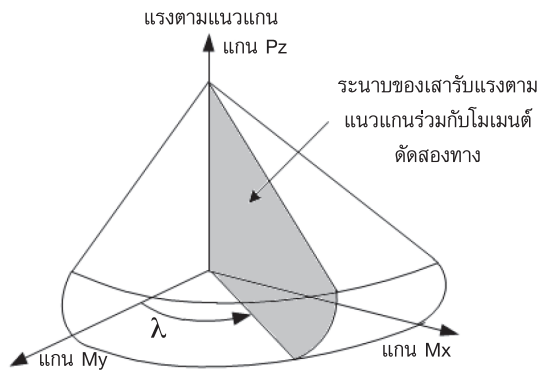
$$\left( \frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} \right)^\alpha + \left( \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right)^\alpha \leq 10 \tag{8}$$

เมื่อ  $\phi P_n$  คือ แรงตามแนวแกนที่ยอมให้ของหน้าตัดเสาที่รับได้

$\phi P_{nx}$  คือ แรงตามแนวแกนที่ยอมให้บนแกน X

$\phi P_{ny}$  คือ แรงตามแนวแกนที่ยอมให้บนแกน Y

$\phi P_o$  คือ แรงตามแนวแกนที่ยอมให้เพียงอย่างเดียว



เมื่อ  $M_{ux}$  คือ โมเมนต์ดัดที่กระทำรอบแกน x

$\phi M_{nx}$  คือ โมเมนต์ดัดที่ยอมให้ของหน้าตัดเสา รอบแกน x

$M_{uy}$  คือ โมเมนต์ดัดที่กระทำรอบแกน y

$\phi M_{ny}$  คือ โมเมนต์ดัดที่ยอมให้ของหน้าตัดเสา รอบแกน y

สำหรับค่า  $\alpha$  ของสมการที่ (8) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแรงตามแนวแกน ( $P_u$ ) ที่กระทำและแรงตามแนวแกนที่ยอมให้เพียงอย่างเดียวของหน้าตัดเสา ( $\phi P_o$ ) โดยค่า  $\alpha$  มีค่าเท่ากับสมการที่ (9) และต้องมีค่าอยู่ระหว่าง  $1.0 < \alpha < 2.0$

$$\alpha = \frac{2}{3} + \frac{5P_u}{3(\phi P_o)} \tag{9}$$

## 2.4 ข้อกำหนดการออกแบบเสาสั้นปลอกเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

มาตรฐานการตรวจสอบผลการออกแบบเลือกใช้ของ ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลัง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ปริมาณเหล็กเสริม ( $A_s$ ) ต้องมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 1 แต่ไม่เกินร้อยละ 8 ของพื้นที่หน้าตัดเสาสี่เหลี่ยม ( $A_g$ ) เหล็กยื่นต้องมีอย่างน้อย 4 เส้น ช่องว่างของเหล็กยื่นต้องไม่ต่ำกว่า 4 ซม. เหล็กปลอกที่เลือกใช้ต้องมีขนาดไม่ต่ำกว่า 6 มม. เมื่อใช้เหล็กยื่นที่มีขนาดไม่เกิน 20 มม. และเลือกใช้เหล็กปลอกขนาดตั้งแต่ 9 มม. ขึ้นไปเมื่อใช้เหล็กยื่นตั้งแต่ขนาด 25 - 32 มม. ตัวคูณลดกำลัง ( $\phi$ ) ที่เลือกใช้คือ 0.7 ค่ากำลังรับแรงตามแนวแกนที่ยอมให้ของหน้าตัดเสา ( $\phi P_n$ ) ต้องมีค่ามากกว่าแรงแนวแกนประลัย ( $P_u$ ) ที่กระทำและค่าโมเมนต์ดัดที่ยอมให้ของหน้าตัดเสา ( $\phi M_n$ ) ต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์ดัดประลัย ( $M_u$ ) ที่กระทำ และสำหรับหน้าตัดเสาที่รับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางให้กำหนดใช้สมการที่ (8) ตรวจสอบ

## 3. อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

SA นำเสนอครั้งแรกโดย Kirkpatrick และคณะ [9] ในปี ค.ศ.1983 เป็นเทคนิคการหาคำตอบทางคณิตศาสตร์ของระบบ AI ซึ่ง SA เป็นเทคนิคที่มีแนวคิดพื้นฐานมาจากกระบวนการหลอมละลายโลหะแข็งด้วยความร้อน จนโลหะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว หลังจากนั้น ปล่อยให้โลหะเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ด้วยการควบคุมความเร็วในการลดอุณหภูมิที่พอเหมาะ และให้โมเลกุลของเหล็กสามารถเปลี่ยนพลังงานจากสูงไปต่ำหรือจากต่ำไปสูงได้ด้วยค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้จากสมการที่ (10) ซึ่งผลการคำนวณจะมีค่าไม่เกิน 1 แล้วเปรียบเทียบกับค่าสุ่ม ( $P'$ ) ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า  $P \geq P'$  จะยอมรับสถานะใหม่เป็นสถานะปัจจุบัน แล้วถ้า  $P < P'$  จะสร้างสถานะใหม่เพื่อให้โมเลกุลของโลหะอยู่ในสถานะที่มีความเสถียร ซึ่งจะทำให้โลหะมีความเหนียว ไม่เปราะเมื่อกลายเป็นผลึกของแข็งอีกครั้ง [10]

$$P = e^{-\Delta E/T_i} \quad (10)$$

เมื่อ  $P$  คือ ความน่าจะเป็นในการยอมรับสถานะใหม่  
 $\Delta E$  คือ ผลต่างของพลังงานที่เปลี่ยนไป  
 $T_i$  คือ อุณหภูมิปัจจุบัน

ในระหว่างกระบวนการอบอ่อนของ SA ค่าอุณหภูมิจะลดลงอย่างคงที่ตลอดกระบวนการตามสมการที่ (11) ด้วยค่าคูณลดอุณหภูมิ ( $\omega$ ) ที่มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งอุณหภูมิปัจจุบัน ( $T_i$ ) จะส่งผลต่อความน่าจะเป็นในการยอมรับสถานะใหม่ของ SA การกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงจะทำให้ SA สามารถสำรวจคำตอบในปริภูมิค้นหาที่กำหนดได้มากขึ้น [11]

$$T_i = \omega T_i \quad (11)$$

จากสมการที่ (10) จะสามารถทำให้ SA ค้นหาคำตอบที่กระจุกกระจายในช่วงต้น เนื่องจาก SA ยังมีอุณหภูมิที่สูงอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิถูกลดลงด้วยสมการที่ (11) จะทำให้การค้นหาคำตอบของ SA ในช่วงปลายเริ่มเข้าสู่คำตอบที่ดีขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมिन้อยลงจะทำให้โอกาสในการยอมรับสถานะที่ด้อยกว่าน้อยลง สำหรับการทำงานของ SA สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. สร้างสถานะเริ่มต้น เป็นการสร้างสถานะคำตอบแรกขึ้นด้วยการสุ่มกำหนดตัวแปรต่างๆ ของปัญหาที่กำหนดไว้ เพื่อสร้างเป็นคำตอบแรกก่อนเข้าสู่กระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสม
2. สร้างสถานะใหม่ เป็นการสร้างสถานะคำตอบใหม่ด้วยการปรับเปลี่ยนจากสถานะเดิมเล็กน้อยโดยการปรับค่าเพิ่มหรือลดในขอบเขตการปรับที่กำหนด
3. การตรวจสอบสถานะ เป็นขั้นตอนการเปรียบเทียบสถานะคำตอบระหว่าง 2 สถานะคือ สถานะใหม่และสถานะปัจจุบัน ถ้าหากสถานะใหม่ดีกว่าสถานะปัจจุบัน สถานะใหม่จะแทนที่สถานะปัจจุบันทันทีและข้ามไปทำขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าสถานะใหม่ไม่ได้ดีกว่าสถานะเดิมให้ทำต่อขั้นตอนที่ 4
4. นำค่าผลต่างของพลังงานที่เปลี่ยนไปมาใช้คำนวณโอกาสความน่าจะเป็น ( $P$ ) ในการยอมรับคำตอบใหม่ด้วย

สมการที่ (10) และนำค่าความน่าจะเป็นเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดจากการสุ่ม ( $P'$ ) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า  $P \geq P'$  จะยอมรับคำตอบใหม่เป็นคำตอบปัจจุบันและทำต่อขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้า  $P < P'$  ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 5

5. ลดอุณหภูมิลงด้วยสมการที่ (11)

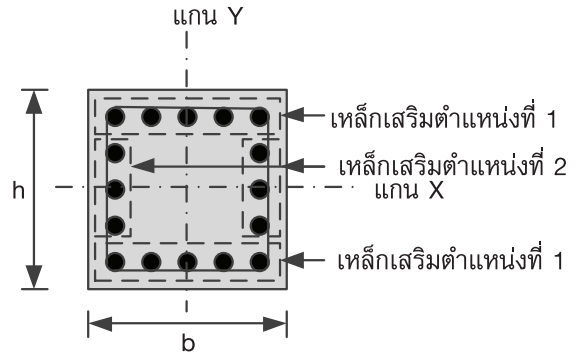
6. ตรวจสอบกับสถานะเป้าหมาย เป็นการตรวจสอบสถานะของคำตอบกับสมการเป้าหมายที่กำหนดขึ้นในแต่ละปัญหา ถ้าสถานะปัจจุบันเป็นสถานะเป้าหมายหรืออุณหภูมิมีค่าเป็น 0 กระบวนการทำงานจะหยุดทันที

#### 4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

##### 4.1 การพัฒนาและขอบเขตการทำงานของโปรแกรม

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Microsoft visual basic 6.0 พัฒนาเป็นโปรแกรมออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมโดยมีขอบเขตการทำงานดังตารางที่ 1 ซึ่งขอบเขตการทำงานได้จากการสำรวจเบื้องต้นจากการออกแบบทั่วไป ประกอบด้วยกำลังอัดของคอนกรีต (ทรงกระบอก) ที่ใช้กับงานก่อสร้างทั่วไปคือ 210, 240, 280, 300 และ 320 กก./ซม.<sup>2</sup> เหล็กยี่สิบกำหนดใช้ระดับชั้น SD30 และ SD40 ส่วนเหล็กปลอกมีระดับชั้น SR24, SD30 และ SD40 โดยสามารถกำหนดเป็นตัวแปรสุ่มหรือเลือกค่าได้ตามต้องการ ด้านแคบ (b) และด้านลึก (h) ของเสาอยู่ในช่วง 20 ถึง 150 ซม. โดยปรับเปลี่ยนทุกๆ 5 ซม. อย่างไรก็ตามค่าต่างๆในการออกแบบขึ้นกับเงื่อนไขการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบ โดยคำนวณกำลังรับน้ำหนักตามสมการที่ 1-9 เป็นหลัก และราคาวัสดุและค่าแรงจะเป็นตัวกำหนดหน้าตัดที่เหมาะสม

สำหรับตำแหน่งเหล็กเสริมจะเสริมโดยรอบหน้าตัดเสาดังรูปที่ 4 ซึ่งมีตำแหน่งที่แตกต่างกัน 2 ตำแหน่ง ประกอบด้วย เหล็กตำแหน่งที่ 1 คือเหล็กเสริมตามด้านแคบของเสา (b) ขอบบนและขอบล่าง และตำแหน่งที่ 2 คือเหล็กเสริมตามด้านลึกของเสา (h) ทั้งสองข้าง มีค่าเพิ่มทุกๆ 1 เส้น โดยเหล็กเสริมทุกตำแหน่งที่สามารถเลือกใช้ได้คือ DB12, DB16, DB20, DB25, DB28, DB32, DB36 และ DB40 เหล็กปลอกที่เลือกใช้คือ RB6, RB9, DB10 และ DB12



รูปที่ 4 ตำแหน่งการเสริมเหล็กในหน้าตัดเสา

##### ตารางที่ 1 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรม

ตัวแปรออกแบบ	ต่ำสุด	สูงสุด	หน่วย
กำลังอัดคอนกรีต (ทรงกระบอก)	210	320	กก./ซม. <sup>2</sup>
กำลังของเหล็กเสริม	3,000	4,000	กก./ซม. <sup>2</sup>
ด้านแคบของเสา (b)	20	150	ซม.
ด้านลึกของเสา (h)	20	150	ซม.
ขนาดของเหล็กยี่สิบ	12	40	มม.
เหล็กปลอก SR24	6	9	มม.
เหล็กปลอก SD30, SD40	10	12	มม.
จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 1	2	40	เส้น/ด้าน
จำนวนเหล็กตำแหน่งที่ 2	0	40	เส้น/ด้าน

ราคาวัสดุที่กำหนดใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งเป็นรายการราคาคอนกรีตผสมเสร็จไม่รวมภาษีราคาแบบหล่อ เหล็กเสริม และค่าแรงงานจากกรมบัญชีค่าแรง/ดำเนินการ สำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างฉบับปรับปรุงปี พ.ศ. 2551 ของคณะกรรมการกำกับนโยบายราคากลางงานก่อสร้างกรมบัญชีกลางกระทรวงการคลัง [12] โดยราคาที่เลือกใช้เป็นเพียงการแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการทำงานของโปรแกรม ซึ่งการใช้งานจริงผู้ต้องใช้ราคาท้องตลาด ณ เวลานั้นๆ เพื่อให้ได้ราคาที่เหมาะสมแท้จริง ราคาที่กำหนดใช้สามารถปรับเปลี่ยนได้ในแต่ละช่วงเวลาตามผู้ออกแบบต้องการ



## ตารางที่ 2 ราคาวัสดุและค่าแรงงาน [12]

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

## 4.2 สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายของงานวิจัยนี้แสดงในสมการที่ (12) ซึ่งสมการนี้ทำให้ผลการออกแบบหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีราคาต่ำที่สุด โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อราคาประกอบด้วย ปริมาตรคอนกรีต ปริมาณแบบหล่อ และปริมาณการเสริมเหล็ก

$$F = \text{Min } \Sigma (V_C C_C + A_F C_F + W_S C_S) \quad (12)$$

เมื่อ  $F$  คือ ราคาวัสดุรวมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, บาท/ม.

$V_C$  คือ ปริมาตรของคอนกรีต, ม.<sup>3</sup>/ม.

$C_C$  คือ ราคารวมวัสดุและค่าแรงสำหรับงานคอนกรีต, บาท/ม.<sup>3</sup>

$A_F$  คือ ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต, ม.<sup>2</sup>/ม.

$C_F$  คือ ราคาแบบหล่อและค่าแรงสำหรับงานหล่อแบบ, บาท/ม.<sup>2</sup>

$W_S$  คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม, กก./ม.

$C_S$  คือ ราคารวมเหล็กเสริมและค่าแรงงาน, บาท/กก.

## 4.3 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

SA ที่พัฒนาใช้กับปัญหาการออกแบบเสาสั้นปลอกเดี่ยวรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทาง มีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 5 ซึ่งก่อนการใช้งาน ต้องกำหนดแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่กระทำทั้งสองแกน และกำหนดพารามิเตอร์ของ SA คือ ร้อยละของอุณหภูมิเริ่มต้นที่ต้องการและ  $\omega$  หลังจากนั้นโปรแกรมจะเริ่มทำงานตามขั้นตอนดังนี้

1. สุ่มสถานะเริ่มต้น เป็นขั้นตอนการสุ่มตัวแปรออกแบบทั้งหมดที่ประกอบด้วย  $f'_c$ ,  $f_c$ ,  $b$ ,  $h$ , ขนาดของเหล็กเสริมและปริมาณเหล็กเสริมทั้ง 2 ตำแหน่ง

2. คำนวณค่า  $\phi P_n$  จากสมการที่ (7)  $\phi M_{nx}$  และ  $\phi M_{ny}$  จากสมการที่ (2) และสมการของ Bresler สมการที่ (8) และราคารวมจากสมการที่ (12) ของผลการออกแบบที่สุ่มได้

3. ตรวจสอบเงื่อนไขออกแบบ โดยนำมามาตรฐานและเงื่อนไขออกแบบในหัวข้อที่ 2.4 มาใช้ตรวจสอบผลการออกแบบ ถ้าผลการออกแบบผ่านเงื่อนไขทั้งหมดให้ทำต่อขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้าไม่ผ่านในบางเงื่อนไข ให้ทำขั้นตอนที่ 1 ใหม่

4. กำหนดสถานะใหม่ที่ผ่านเงื่อนไขออกแบบและสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยเป็นสถานะล่าสุด และคำนวณค่าอุณหภูมิเริ่มต้นโดยคิดเป็นร้อยละของราคาผลการออกแบบล่าสุด หลังจากนั้นจะเข้าสู่การออกแบบที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 5

5. สุ่มสถานะใหม่ ได้ปรับปรุงตัวแปรจากสถานะเดิมบางตำแหน่งด้วยการสุ่มปรับตัวแปรออกแบบไปยังตัวแปรออกแบบที่ใกล้เคียงเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียง 1 ชั้น ซึ่งมีลักษณะการปรับสุ่มดังรูปที่ 6 โดยในบางตำแหน่งของตัวแปรออกแบบอาจไม่ปรับเปลี่ยน

6. คำนวณค่า  $\phi P_n$  จากสมการที่ (7)  $\phi M_{nx}$  และ  $\phi M_{ny}$  จากสมการที่ (2) และสมการของ Bresler สมการที่ (8) และราคารวมจากสมการที่ (12) ของสถานะคำตอบใหม่

7. ตรวจสอบเงื่อนไขออกแบบของสถานะคำตอบใหม่ โดยนำมามาตรฐานและเงื่อนไขออกแบบในหัวข้อที่ 2.4 (ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลัง) มาใช้ตรวจสอบผลการออกแบบของสถานะใหม่ ถ้าสถานะใหม่ผ่านเงื่อนไขออกแบบให้ทำต่อขั้นตอนที่ 8 แต่ถ้าไม่ผ่านในบางเงื่อนไขให้ทำต่อขั้นตอนที่ 11

8. เปรียบเทียบสถานะ โดยนำผลการออกแบบของสถานะใหม่เปรียบเทียบกับสถานะปัจจุบัน ถ้าสถานะใหม่มีความประหยัดมากกว่าสถานะปัจจุบัน ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 10 แต่ถ้าสถานะใหม่สิ้นเปลืองกว่าสถานะปัจจุบัน ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 9

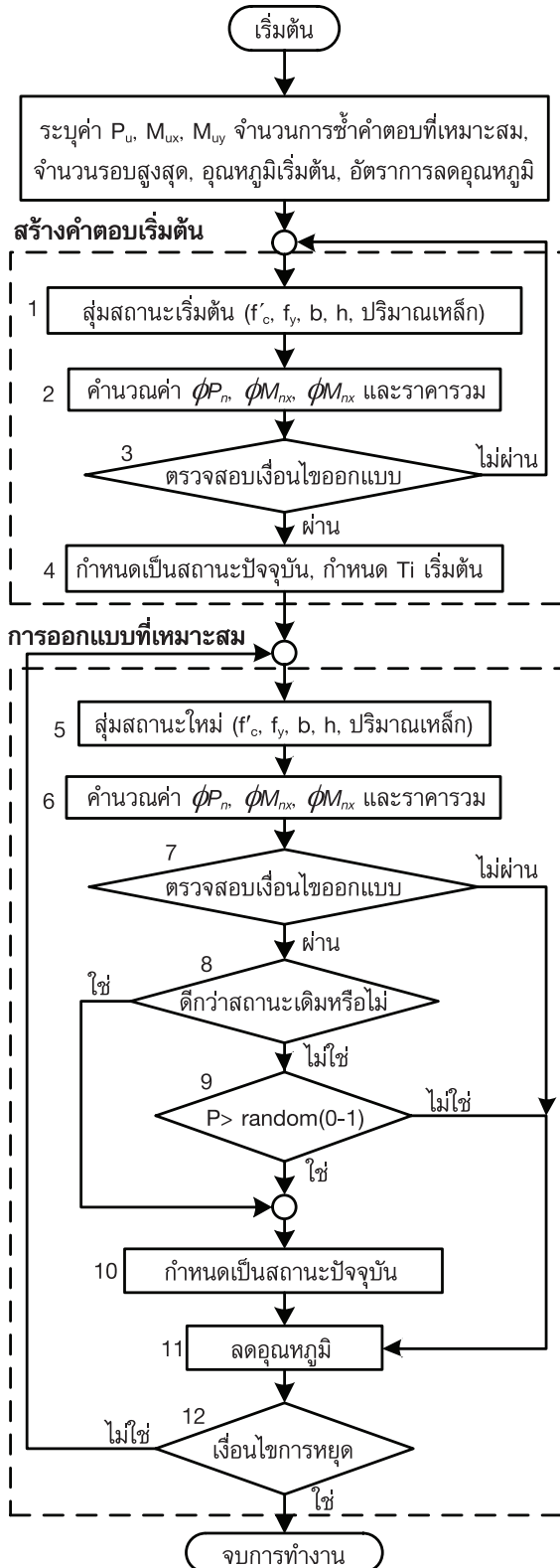
9. คำนวณค่าผลต่างของราคาของสถานะเดิมและสถานะใหม่ ( $\Delta E$ ) จากนั้นคำนวณค่าโอกาสในการยอมรับ

สถานะใหม่  $P$  ด้วยสมการที่ (10) หลังจากนั้น นำผลจากสมการนี้เปรียบเทียบกับค่าที่เกิดจากการสุ่ม  $P'$  ที่มีค่าไม่เกิน 1 ถ้า  $P \geq P'$  ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 10 แต่ถ้า  $P < P'$  ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 11

10. กำหนดสถานะคำตอบใหม่แทนที่สถานะคำตอบปัจจุบัน คือ การกำหนดสถานะของคำตอบหรือผลการออกแบบล่าสุดไว้ใช้เปรียบเทียบกับผลคำตอบใหม่

11. ปรับอุณหภูมิลงด้วยอัตราลดเท่ากับ  $\mathcal{O}$  หลังจากนั้นคำนวณอุณหภูมิใหม่ด้วยสมการที่ (11)

12. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าอุณหภูมิเป็น 0 โปรแกรมจะหยุดการทำงานทันที แต่ถ้าอุณหภูมียังไม่เป็น 0 ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม SA

ตัวแปรออกแบบ	$f'_c$	$f_y$	b	h	Bar1	No.1	Bar2	No.2
-1 ระดับ ↑	210	3000	35	55	DB20	6	DB16	2
สถานะปัจจุบัน	240	4000	40	60	DB25	8	DB20	4
+1 ระดับ ↓	280	4000	45	65	DB28	10	DB25	6
สถานะใหม่	210	4000	45	55	DB28	10	DB16	4

รูปที่ 6 การสุ่มปรับสถานะใหม่ที่ปรับเปลี่ยนจากค่าตอบเดิม

#### 4.4 การทดสอบอัลกอริทึมการจำลองการรอบเหนียว

##### 4.4.1 ทดสอบหาอุณหภูมิและอัตราการผลิตอุณหภูมิที่เหมาะสม

ก่อนการใช้งานโปรแกรม SA จะต้องกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการผลิตอุณหภูมิเพื่อเป็นการกำหนดความเร็วและความแม่นยำของ SA ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ของ SA ที่เหมาะสมได้นั้นตัวอย่างที่ 1 ในตารางที่ 3 ทดสอบออกแบบด้วยการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นโดยคิดเป็นร้อยละของราคาผลการออกแบบเริ่มต้นเป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้น [5] เนื่องจากยังไม่มีวิธีการใดที่สามารถประมาณค่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่แน่นอนได้ [13] ซึ่งการกำหนดจากร้อยละของราคาผลการออกแบบเริ่มต้นจะทำให้ SA ใช้งานง่ายมากขึ้น สำหรับอุณหภูมิเริ่มต้นจะกำหนดที่ร้อยละ 25, 50, 100, 200 และ 400 ของราคาสถานะเริ่มต้น และในทุกการทดสอบจะกำหนดอัตราการผลิตอุณหภูมิตั้งแต่ร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างของจำนวนรอบการทำงานและราคารวมอีกทั้งค่าที่กำหนดต้องครอบคลุมค่าที่เหมาะสมด้วย

##### 4.4.2 ทดสอบกับตัวอย่างออกแบบ

หลังจากที่ได้อุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการผลิตอุณหภูมิที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 4.4.1 แล้วให้นำค่าพารามิเตอร์ของ SA มาใช้ทดสอบกับตัวอย่างออกแบบโดยกำหนดใช้ตัวอย่างที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก กำลังรับน้ำหนักตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดทั้งสองแกนที่แตก

ต่างกันจำนวน 4 ตัวอย่างดังตารางที่ 3 ซึ่งเป็นตัวอย่างถูกเลือกมาจากอาคาร 4 ขนาดที่พบเห็นได้ทั่วไป โดยตัวอย่างที่ 1 กำลังรับน้ำหนักโดยประมาณของอาคารขนาด 2 – 3 ชั้น ตัวอย่างที่ 2 กำลังรับน้ำหนักโดยประมาณของอาคารขนาด 4 – 6 ชั้น ตัวอย่างที่ 3 กำลังรับน้ำหนักโดยประมาณของอาคารขนาด 8 - 10 ชั้น และตัวอย่างที่ 4 กำลังรับน้ำหนักโดยประมาณของอาคารขนาด 10 - 12 ชั้น เพื่อแสดงให้เห็นว่า SA สามารถออกแบบอาคารที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไปได้ ด้วยการทดสอบตัวอย่างละ 10 ครั้ง และใช้สถิติ t-test ทดสอบวัดความแตกต่างของราคาเฉลี่ยระหว่างกลุ่มตัวอย่างกับประชากรที่มีราคาต่ำสุดที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 โดยมีสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) คือ ประชากรที่มีราคาต่ำสุดมีค่าเท่ากับราคาเฉลี่ยของกลุ่มประชากร และสมมติฐานรอง ( $H_1$ ) คือ ประชากรที่มีราคาต่ำสุดมีค่าแตกต่างจากราคาเฉลี่ยของกลุ่มประชากร

ตารางที่ 3 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	แรงตามแนวแกน (กก.)	$M_{ux}$ (กก-ม.)	$M_{uy}$ (กก-ม.)	ระยะหุ้ม (ซม.)
1	95,000	9,500	6,500	3.5
2	125,000	10,000	4,000	5
3	400,000	45,000	75,000	7
4	500,000	212,400	100,000	9

## 5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

### 5.1 ผลการทดสอบกำหนดอุณหภูมิและอัตราการลดอุณหภูมิ

จากการทดสอบกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิที่ต่างกันพบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อจำนวนรอบและผลของคำตอบมากที่สุดคือ อัตราการลดอุณหภูมิ ซึ่งจากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า การกำหนดอัตราการลดอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้จำนวนรอบน้อยลงแต่ราคารวมกลับสูงขึ้น นอกจากนี้ อัตราการลดอุณหภูมิที่ร้อยละ 1 และ 2 มีจำนวนรอบที่แตกต่างกันประมาณ

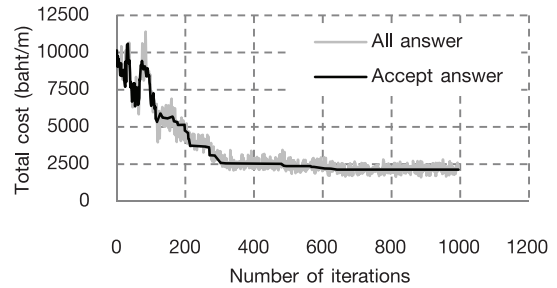
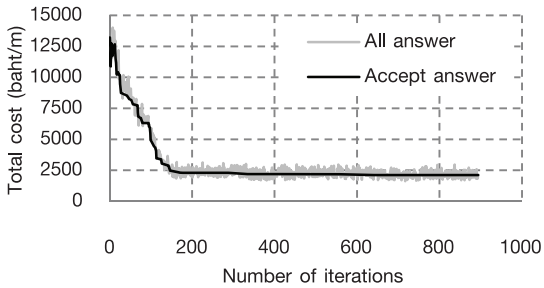
2,000 รอบ โดยที่คำตอบเท่ากันทุกอุณหภูมิเริ่มต้น และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนรอบของอัตราการลดอุณหภูมिर้อยละ 2 และ 3 พบว่า มีจำนวนรอบต่างกันประมาณ 600 รอบ แต่คำตอบที่ได้ไม่เท่ากันในบางกรณี นอกจากนี้ การเลือกใช้ราคารวมของเสาในสถานะเริ่มต้นเป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในอัลกอริทึมให้ผลของราคาเฉลี่ยในทุกอัตราการลดอุณหภูมิตีที่สุด (ดูได้จากตารางที่ 4) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นร้อยละ 100 ของราคาสถานะเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมिर้อยละ 2 เพื่อให้ SA มีเวลามากพอในการหาคำตอบที่เหมาะสม

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเมื่อกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นแบบอัตโนมัติที่อัตราการลดอุณหภูมิต่างๆ

อัตรา การลด อุณหภูมิ (ร้อยละ)	อุณหภูมิเริ่มต้น									
	ร้อยละ 25 ของ คำตอบเริ่มต้น		ร้อยละ 50 ของ คำตอบเริ่มต้น		ร้อยละ 100 ของ คำตอบเริ่มต้น		ร้อยละ 200 ของ คำตอบเริ่มต้น		ร้อยละ 400 ของ คำตอบเริ่มต้น	
	จำนวน รอบ	ราคา	จำนวน รอบ	ราคา	จำนวน รอบ	ราคา	จำนวน รอบ	ราคา	จำนวน รอบ	ราคา
1	3,771	<u>2,114</u>	3,881	<u>2,114</u>	3,915	<u>2,114</u>	3,827	<u>2,114</u>	3,918	<u>2,114</u>
2	1,881	<u>2,114</u>	1,928	<u>2,114</u>	1,950	<u>2,114</u>	1,974	<u>2,114</u>	1,992	<u>2,114</u>
3	1,220	2,265	1,283	<u>2,114</u>	1,297	<u>2,114</u>	1,312	2,210	1,321	<u>2,114</u>
4	921	2,216	950	2,116	966	<u>2,114</u>	978	2,177	959	2,125
5	731	2,262	757	2,116	757	2,116	764	2,295	762	2,116
10	354	2,509	365	2,321	373	2,212	379	2,371	379	2,176
15	234	2,344	231	2,216	238	2,124	243	2,449	247	2,463
20	170	2,333	171	2,197	177	2,547	174	2,126	181	2,192
25	131	2,372	136	3,124	137	2,341	136	2,509	139	2,333
30	106	2,628	107	2,453	111	2,570	112	2,892	112	2,889
ค่าเฉลี่ย	-	2,316	-	2,289	-	<u>2,237</u>	-	2,326	-	2,264

ผลจากการทดสอบกำหนดใช้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ต่างกันแสดงให้เห็นว่า การกำหนดใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ต่างกันจะทำให้ลักษณะการเข้าสู่ จำนวนรอบและผลคำตอบของ SA มีความแตกต่างกันดังรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปที่ 7(ก)

มีจำนวนรอบน้อยกว่ารูปที่ 7(ข) แต่ผลคำตอบมีความสิ้นเปลืองกว่า นอกจากนี้ รูปที่ 7(ข) SA มีการแกว่งขึ้นลงเป็นอย่างมากเมื่อมีอุณหภูมิสูง จึงทำให้ SA สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างทั่วถึง



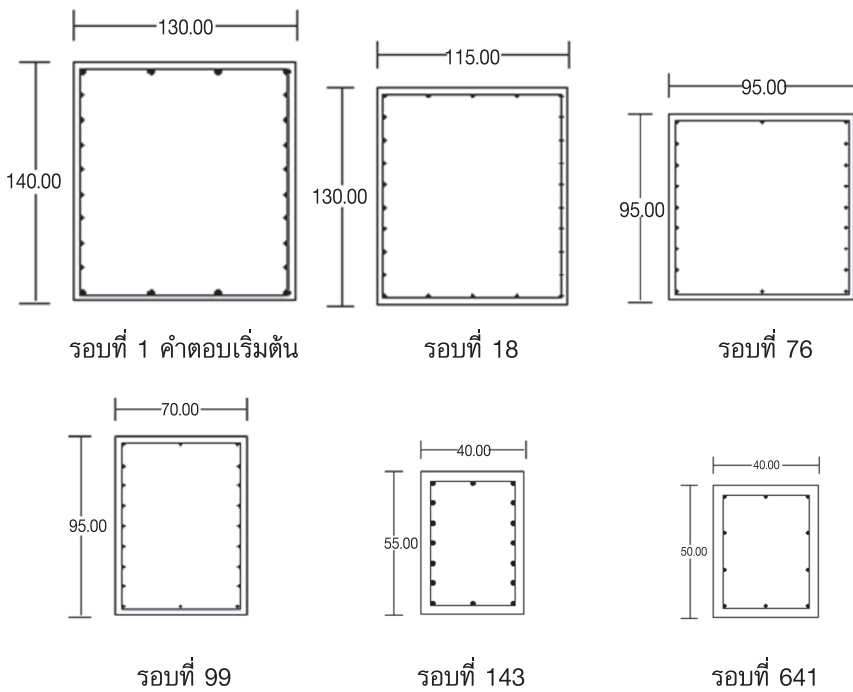
ก) อุณหภูมิเริ่มต้นร้อยละ 25 อัตราการลดร้อยละ 4

ข) อุณหภูมิเริ่มต้นร้อยละ 400 อัตราการลดร้อยละ 4

**รูปที่ 7** ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบเมื่อกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่แตกต่างกัน

การหาคำตอบในรูปที่ 7 จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุ ขนาดหน้าตัดเสาและปริมาณเหล็กเสริมในทุกรอบการคำนวณดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดหน้าตัดเสาเริ่มต้นมีขนาดใหญ่มาก หลังจากนั้น

ขนาดหน้าตัดเสามีขนาดที่เล็กลงเมื่ออุณหภูมิน้อยลงและมีจำนวนรอบที่สูงขึ้น สังเกตได้จากกราฟรูปที่ 6 ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงก่อนหยุดการทำงาน



**รูปที่ 8** หน้าตัดเสาที่เปลี่ยนไปเมื่อจำนวนรอบสูงขึ้น

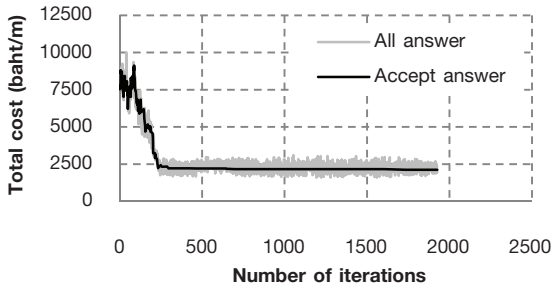
## 5.2 ผลการทดสอบออกแบบกับตัวอย่าง

จากการทดสอบ SA กับตัวอย่างออกแบบ ด้วยการกำหนดใช้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ร้อยละ 100 ของราคาสถานะเริ่มต้น และอัตราการลดอุณหภูมิร้อยละ 2 ในตารางที่ 3 ได้ผลการออกแบบทั้ง 10 ครั้ง ดังตารางที่ 5 ซึ่งคำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1 คือ ราคา 2,114 บาท/ม. ซ้ำกัน 7 ครั้ง ตัวอย่างที่ 2 คือ ราคา 1,959 บาท/ม. ซ้ำกัน 7 ครั้ง ตัวอย่างที่ 3 คือ ราคา 5,959 บาท/ม. ซ้ำกัน 9 ครั้ง และตัวอย่างที่ 4 คือ ราคา

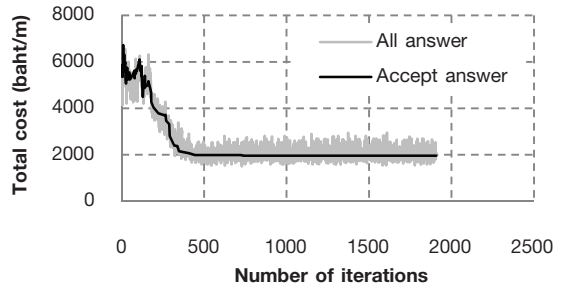
9,560 บาท/ม. ซ้ำกัน 8 ครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า การกำหนดค่าอุณหภูมิและอัตราการลดอุณหภูมิที่เลือกใช้ ทำให้ได้ผลการออกแบบในแต่ละตัวอย่างที่เหมือนกันมากกว่า 5 ครั้ง นอกจากนี้ เมื่อทดสอบสถิติด้วย t-test ทำให้แน่ใจได้ว่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิที่เลือกใช้เป็นค่าที่เหมาะสม เพราะค่าสถิติทดสอบอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ทุกการทดสอบและการทดสอบตัวอย่างละ 10 ครั้ง ให้ผลการทดสอบทางสถิติอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ตารางที่ 5 ผลการออกแบบที่เหมาะสมตัวอย่างละ 10 ครั้ง

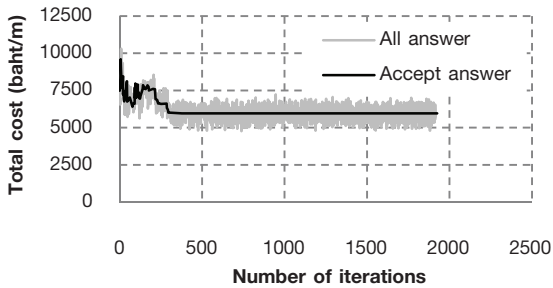
ครั้งที่	ตัวอย่างทดสอบ							
	1		2		3		4	
	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม
1	1,940	2,114	1,923	1,967	1,934	6,027	1,950	9,676
2	1,959	2,114	1,886	1,959	1,970	5,959	<b>1,941</b>	<b>9,560</b>
3	1,956	2,116	<b>1,915</b>	<b>1,959</b>	1,930	5,959	1,958	9,560
4	1,948	2,126	1,954	1,959	1,952	5,959	1,967	9,560
5	1,947	2,114	1,908	1,959	1,955	5,959	1,954	9,560
6	1,926	2,114	1,863	1,967	1,926	5,959	1,963	9,560
7	<b>1,925</b>	<b>2,114</b>	1,950	1,959	<b>1,925</b>	<b>5,959</b>	1,948	9,560
8	1,958	2,114	1,953	1,959	1,960	5,959	1,961	9,560
9	1,949	2,114	1,944	1,967	1,935	5,959	1,950	9,561
10	1,913	2,126	1,950	1,959	1,949	5,959	1,949	9,560
ค่าเฉลี่ย	1,942	2,117	1,924.6	1,961.4	1,943.6	5,965.8	1,954	9,572
ค่าต่ำสุด	1,913	2,114	1,863	1,959	1,925	5,959	1,941	9,560
ค่าสูงสุด	1,959	2,126	1,954	1,967	1,970	6,027	1,967	9,676
ค่าความแปรปรวน	15.7793	4.9933	31.6094	3.8643	15.6432	21.5035	8.0062	36.6486
ฐานนิยม	1,948	2,114	1,934	1,959	1,942	5,959	1,952	9,560
ค่าวิกฤต	-	<b>2.82</b>	-	<b>2.82</b>	-	<b>2.82</b>	-	<b>2.82</b>
T-test	-	<b>1.8999</b>	-	<b>1.9639</b>	-	<b>1.00</b>	-	<b>1.0095</b>
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	-	ยอมรับ H0	-	ยอมรับ H0	-	ยอมรับ H0	-	ยอมรับ H0



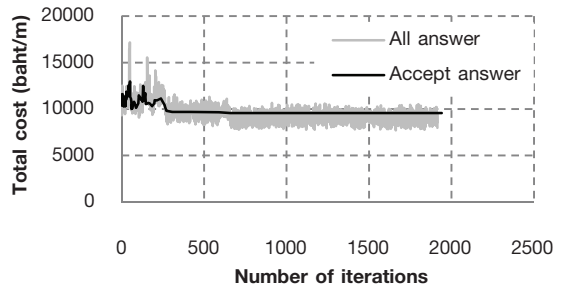
ก) การลู่เข้าหาคำตอบของ SA ตัวอย่างที่ 1



ข) การลู่เข้าหาคำตอบของ SA ตัวอย่างที่ 2



ค) การลู่เข้าหาคำตอบของ SA ตัวอย่างที่ 3



ง) การลู่เข้าหาคำตอบของ SA ตัวอย่างที่ 4

**รูปที่ 9** ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบของ SA ทั้ง 4 ตัวอย่าง

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างราคาของผลการออกแบบและจำนวนรอบ กราฟจะมีลักษณะดังรูปที่ 9(ก-ง) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ SA จะค่อนข้างแกว่งในช่วงแรกเนื่องจาก SA มีอุณหภูมิที่มากพอในการกระโดดไปยังตำแหน่งต่างๆ เพื่อสำรวจคำตอบอย่างกว้างๆ หลังจากนั้น เมื่ออุณหภูมิลดลงจนไม่สามารถกระโดดได้ SA จะเริ่มลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีมากขึ้นและเริ่มเป็นเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิมิมีค่าเข้าใกล้ 0 ผลการออกแบบที่ดีที่สุดของทั้ง 4 ตัวอย่างแสดง

ในตารางที่ 6 ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า ผลการออกแบบของทุกตัวอย่าง เลือกใช้ค่ากำลังวัสดุที่สูงที่สุด และมีปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุดเพียงร้อยละ 1 จึงทำให้สามารถกล่าวได้ว่า การออกแบบที่ประหยัดควรเลือกกำลังของวัสดุที่สูงซึ่งจะทำให้สามารถลดขนาดหน้าตัดเสาและปริมาณเหล็กเสริมให้น้อยลงได้อย่างมากโดยที่หน้าตัดเสายังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ตาม หากคอนกรีตมีราคาที่สูงขึ้น และเหล็กเสริมมีราคาต่ำลง ผลการออกแบบที่ได้อาจเปลี่ยนแปลงไป



ตารางที่ 6 ผลการออกแบบที่ดีที่สุดของ SA

ตัวอย่างออกแบบ	1	2	3	4
$f'_c$ (กก./ซม. <sup>2</sup> )	320	320	320	320
$f_y$ (กก./ซม. <sup>2</sup> )	4,000	4,000	4,000	4,000
b (ซม.)	40	35	80	100
h (ซม.)	50	50	95	135
เหล็กเสริมตำแหน่งที่ 1	6 – DB16	6 – DB16	6 – DB25	4 – DB32
เหล็กเสริมตำแหน่งที่ 2	4 – DB16	6 – DB12	10 – DB25	14 – DB32
เหล็กปลอก	RB6@0.25	RB6@0.25	DB12@0.40	DB12@0.50
$A_s$ (ซม. <sup>2</sup> )	20.11	18.85	78.54	144.76
$\rho_s$ (%)	1.01	1.08	1.03	1.07
จำนวนรอบ	1,925	1,915	1,925	1,941
เวลา (วินาที)	19	19	19	20
ราคาค่าก่อสร้าง (บาท/ม.)	2,114	1,959	5,959	9,560

## 6. สรุป

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้ SA สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางด้วยการพัฒนาเป็นโปรแกรมออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้ Microsoft visual basic 6 พบว่า SA สามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางได้ โดยผลการออกแบบที่ได้คือ กำลังของวัสดุ ขนาดหน้าตัดเสาและปริมาณเหล็กเสริมที่ทำให้ผลการออกแบบมีราคาต่ำที่สุดในเงื่อนไขการออกแบบแต่การใช้งานโปรแกรมต้องเลือกค่าพารามิเตอร์ของ SA ให้มีความเหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับงานที่เลือกใช้จะส่งผลให้ SA มีความรวดเร็วและมีความแม่นยำในการหาคำตอบมากขึ้น โดยกำหนดให้ราคารวมของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กในสถานะเริ่มต้นเป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและเลือกใช้อัตราการลดอุณหภูมิร้อยละ 2 ส่งผลให้การออกแบบมีเสถียรภาพสูงสุดทั้งจำนวนรอบและราคารวมของเสา

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องวิจัยคอนกรีต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

## 9. เอกสารอ้างอิง

1. Balling R.J., 1991, "Optimal steel frame design by simulated annealing", *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, pp. 1780–1795.
2. Ceranic B., Fryer F. and Baines R.W., 2001, "An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures", *Computers and structures*, Vol. 79, pp. 1569-1581.
3. Oguzhan H. and Fuat E., 2002, "Layout optimisation of trusses using simulated annealing", *Advances in Engineering Software*, Vol. 33, pp. 681–696.

4. Hyo S.P. and Chang W.S., 2002, "Optimization of steel structures using distributed simulated annealing algorithm on a cluster of personal computers", *Computers and structures*, Vol. 80, pp. 1305–1316.
5. Lamberti L., 2008, "An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures", *Computers and Structures*, Vol. 86, pp. 1936–1953.
6. Garcia N.P., Sanchez M., Medaglia A.L. and Chateaneuf A., 2011, "A hybrid topology optimization methodology combining simulated annealing and SIMP", *Computers and structures*, Vol. 89, pp. 1512–1522.
7. Engineering Institute of Thailand, 1997, "Standard of reinforced concrete building, strength method (E.I.T. 1008-38)", (In Thai).
8. Bresler B., 1960, "Design criteria for reinforced columns under axial load and biaxial bending", *ACI Structure Journal*, Vol. 57, pp. 481-490.
9. Kirkpatrick C.D., Gelatl Jr. and Vecchi M.P., 1983, "Optimization by simulated annealing". *Science*, Vol. 220, pp. 671-680.
10. Leite J.P.B., Topping B.H.V., 1999, "Parallel simulated annealing for structural optimization", *Computers and Structures*, Vol. 73, pp. 545-564.
11. Pantelides C.P. and Tzan S.R., 2000, "Modified iterated simulated annealing algorithm for structural synthesis", *Advances in Engineering Software*, Vol. 31, pp. 391-400.
12. Committee of construction price, 2551, "Labor account/operation for estimate and calculate price (revised edition) year 2551", Bangkok (In Thai).
13. Hyeon J.C., Se Y.O. and Doo H.C., 1998, "Population-oriented simulated annealing technique based on local Temperature concept", *Electronics Letters*, Vol. 34, pp. 312-313.