



การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมโดยอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว
OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BEAMS BY SIMULATED ANNEALING
ALGORITHM

นักทฤษฎี เหล่าพรหม¹, เรืองรุชต์ ชีระโรจน์², จักรพันธ์ วงษ์พา³

¹นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โทร: 091-061-2126, E-mail: nuttakrit23@hotmail.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โทร: 086-455-5981, E-mail: raungrut@hotmail.com

³อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โทร: 087-127-8885, E-mail: j.wongpa@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว สำหรับการออกแบบค่าที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยกำหนดราคาต่ำสุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งข้อมูลที่ใช้เป็นตัวแปรสำหรับการหาค่าที่เหมาะสม ได้แก่ ขนาดหน้าตัดคาน กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ปริมาณเหล็กเสริม กำลังครากของเหล็กเสริม ราคาวัสดุ และค่าแรงงานใช้โปรแกรม MATLAB ในการพัฒนาขั้นตอนของอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างนั้นใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการออกแบบรายละเอียดต่าง ๆ ใช้มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยวิธีกำลัง (วสท.1008-38) จากผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียวสามารถใช้ออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การออกแบบอย่างเหมาะสม, คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว

ABSTRACT

This research is to present the application of simulated annealing algorithm for optimizing of reinforced concrete beam. The minimum cost is applied as the objective function. Gross cross-sectional area of beam, compressive strength of concrete, reinforcing steel, yield strengths, material cost and labor cost were the variables to determine the optimize a beam. MATLAB programming was used for developing the simulated annealing algorithm. Analysis of beams were performed by finite element method while the designed beams were verified with the strength design method, standard suggested by The Engineering Institute of Thailand (EIT. 1008-38). The results showed that the simulated annealing algorithm is suitable for efficiently design an optimum reinforced concrete beam.

KEYWORDS: optimum design, reinforced concrete beam, simulated annealing algorithm

1. บทนำ

ในปัจจุบันราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงมีราคาสูงขึ้นทำให้ต้นทุนในงานก่อสร้างสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนด้วยวิธีทั่วไป บางครั้งอาจใช้ปริมาณวัสดุจำนวนมากเกินจำเป็น ทั้งนี้ขึ้นกับประสบการณ์ของผู้ออกแบบโดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิศวกรที่ยังขาดประสบการณ์ในบางครั้งอาจออกแบบหน้าตัดที่ไม่เหมาะสม ทำให้สิ้นเปลืองโดยเปล่าประโยชน์ อีกทั้งในบางกรณีอาจเกิดการออกแบบผิดพลาดทำให้เกิดอันตรายอย่างยิ่งต่อผู้ใช้นั้นผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดการหาค่าที่เหมาะสมมาแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm : SA) เป็นวิธีการอย่างหนึ่งในระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) ที่นิยมสำหรับการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมเมื่อปริภูมิการค้นหานั้นไม่ต่อเนื่อง โดยก่อนหน้านี้ได้มีงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมต่างๆ มาแก้ไขปัญหาค่าที่เหมาะสม อาทิ เช่น Nimitawat และ Nanakorn [1] นำจินตนาการอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA) มาประยุกต์ใช้ในการค้นหารูปแบบการจัดวางคานที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ความยาวรวมของคานภายในอาคารที่น้อยที่สุดเป็น Cheng [2] หาค่าที่เหมาะสมของโครงสร้างสะพานเหล็กโค้งโดยใช้ GA ร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าหน้าหนักรวมของโครงสร้างเหล็กที่น้อยที่สุด Noilubla และ Bureerat [3] ได้นำอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการหลายวัตถุประสงค์ (Multiobjective Evolutionary Algorithms) มาใช้ร่วมกับการหาค่าที่เหมาะสมของขนาดหน้าตัดเหล็กและรูปร่างของโครงสร้างโครงข้อหมุนแบบสามมิติเพื่อหาน้ำหนักเหล็กที่น้อยที่สุดและรูปร่างที่เหมาะสมในเวลาเดียวกัน Ignacio Paya-Zaforteza [4] ได้นำ SA มาใช้ร่วมกับการออกแบบโครงข้อแข็งเพื่อหาน้ำหนักเหล็กที่น้อยที่สุดเป็นค่าที่เหมาะสมต่อมา Lamberti [5] ได้พัฒนา SA ให้มีประสิทธิภาพในการค้นหามากยิ่งขึ้นโดยเรียกใหม่ว่า CMLPSA (Corrected Multi-Level & Multi-Point Simulated Annealing) ทำให้สามารถออกแบบโครงถักให้มีความประหยัดมากยิ่งขึ้น จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้น แสดงให้เห็นว่าการหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละงานแตกต่างกันไป

2. อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว

Kirkpatrick และคณะ [6] ได้นำเสนอเทคนิคการหาค่าตอบทางคณิตศาสตร์ในระบบ AI เรียกว่า SA ในปี ค.ศ.1983 ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีแนวคิดพื้นฐานมาจากระบวนการหลอมโลหะ โดยการทำให้โลหะหลอมละลายด้วยความร้อนจากนั้นค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ ด้วยการควบคุมความเร็วในการลดอุณหภูมิของโลหะซึ่งอาศัยความน่าจะเป็นในการลดอุณหภูมิตามสมการที่ (1) ทำให้อะตอมของโลหะจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในรูปของแข็งที่มีความเหนียว

$$P = e^{-\Delta E / T_i} \quad (1)$$

โดยที่

ΔE	คือ ระดับพลังงานที่เปลี่ยนไป
T_i	คือ อุณหภูมิ
P	คือ ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะเปรียบเทียบกับค่าสุ่มระหว่าง 0-1

ในระหว่างกระบวนการอบเหนียว ค่าอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการตามสมการที่ (2) ด้วยค่าอุณหภูมิ (ω) ที่มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งอุณหภูมิปัจจุบัน (T_i) จะส่งผลต่อความน่าจะเป็นในการยอมรับสถานะใหม่ของ SA การกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงจะทำให้ SA สามารถสำรวจคำตอบในปริภูมิค้นหาที่กำหนดได้มากขึ้น [7]

$$T_i = \omega T_i \quad (2)$$

การทำงานของ SA สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. สร้างสถานะเริ่มต้น เป็นการสร้างสถานะคำตอบแรกขึ้นด้วยการสุ่มกำหนดตัวแปรต่างๆ ของปัญหาที่กำหนดไว้ เพื่อสร้างเป็นคำตอบแรกก่อนเข้าสู่กระบวนการหาคำตอบที่เหมาะสม

2. สร้างสถานะใหม่ เป็นการสร้างสถานะคำตอบใหม่ด้วยการปรับเปลี่ยนจากสถานะเดิมเล็กน้อยโดยการปรับค่าเพิ่มหรือลดในขอบเขตการปรับที่กำหนด

3. การตรวจสอบสถานะ เป็นขั้นตอนการเปรียบเทียบสถานะคำตอบระหว่าง 2 สถานะคือ สถานะใหม่และสถานะปัจจุบัน ถ้าหากสถานะใหม่ดีกว่าสถานะปัจจุบัน สถานะใหม่จะแทนที่สถานะปัจจุบันทันทีและข้ามไปทำขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าสถานะใหม่ไม่ได้ดีกว่าสถานะเดิมให้ทำต่อขั้นตอนที่ 4

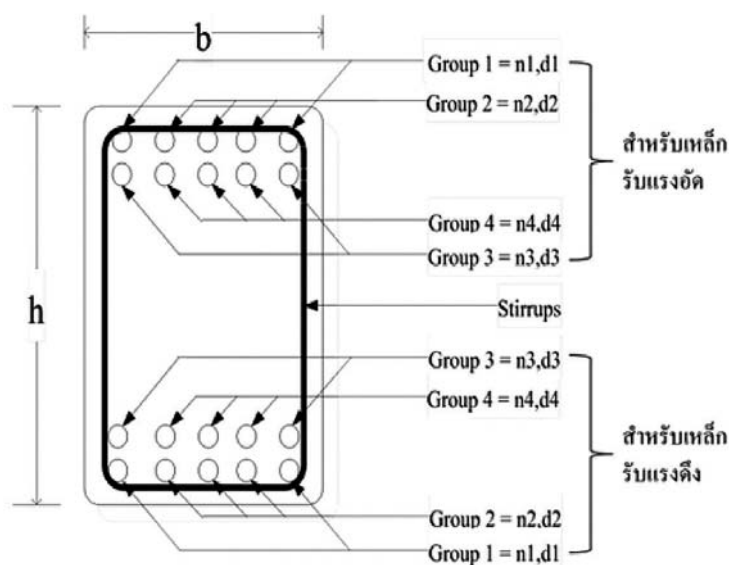
4. นำค่าผลต่างของพลังงานที่เปลี่ยนไปมาใช้คำนวณโอกาสความน่าจะเป็น (P) ในการยอมรับคำตอบใหม่ด้วยสมการที่ (1) และนำค่าความน่าจะเป็นเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดจากการสุ่ม (P') ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า $P \geq P'$ จะยอมรับคำตอบใหม่เป็นคำตอบปัจจุบันและทำต่อขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้า $P < P'$ ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 2

5. ลดอุณหภูมิลงด้วยสมการที่ (2)

6. ตรวจสอบกับสถานะเป้าหมาย เป็นการตรวจสอบสถานะของคำตอบกับสมการเป้าหมายที่กำหนดขึ้นในแต่ละปัญหา ถ้าสถานะปัจจุบันเป็นสถานะเป้าหมายหรืออุณหภูมิมีค่าเป็น 0 กระบวนการทำงานจะหยุดทันที

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB 2010a พัฒนาเป็นโปรแกรมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมโดยออกแบบตัวแปรที่ใช้ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กดังต่อไปนี้ ขนาดหน้าตัดคาน กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก กำลังครากของเหล็กเสริม และรูปแบบการเสริมเหล็ก ความกว้างได้แก่ 20, 25 และ 30 ซม. ความสูงได้แก่ 30, 35, 40, 45, 50 และ 60 ซม. มีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงอยู่ระหว่าง 1:3 ถึง 2:3 ซึ่งทำให้มีรูปแบบการเลือกหน้าตัดคาน 18 รูปแบบ กำลังอัดคอนกรีตได้แก่ 180, 210, 240 และ 280 กก./ซม². เหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดได้แก่ DB12, DB16, DB20 และ DB25 โดยที่เสริมเหล็กไม่เกิน 2 ชั้น คุณภาพเหล็ก SD30 และ SD40 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนได้แก่ RB6 และ RB9 ทำให้มีรูปแบบการเลือกหน้าตัดคาน 160 รูปแบบ ดังแสดงรูปที่ 1 และตารางที่ 1 โดยที่ Group คือ กลุ่มของเหล็กเสริม n คือ จำนวนของเหล็กเสริม (เส้น) d คือ ขนาดของเหล็กเสริม(ม.ม.) และมีเงื่อนไขว่า $\text{Group } 1 + \text{Group } 2 \geq \text{Group } 3 + \text{Group } 4$



รูปที่ 1 การจัดเรียงเหล็กเสริมสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 1 ฐานข้อมูลรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ลำดับ	n1	d1	n2	d2	n3	d3	n4	d4	$A_s (cm^2)$
1	2	12	0	0	0	0	0	0	2.262
2	2	12	1	12	0	0	0	0	3.393
3	2	16	0	0	0	0	0	0	4.021
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
81	2	20	2	16	2	16	2	16	20.600
82	2	25	1	25	2	16	2	16	20.758
83	2	25	1	25	2	20	0	0	21.009
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
158	2	25	3	25	2	25	3	20	43.792
159	2	25	3	25	2	25	2	25	44.184
160	2	25	3	25	2	25	3	25	49.094

3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การหาค่าที่เหมาะสมนั้นจำเป็นจะต้องมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งในการศึกษารังนี้ได้นำค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และมีข้อกำหนดในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเป็นการคัดค่าตอบที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้งานได้จริง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เขียนเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$F = \text{Min} \sum (V_C \cdot C_C + W_{S1} \cdot C_{S1} + W_{S2} \cdot C_{S2} + A_F \cdot C_F) \quad (3)$$

โดยที่ F = ราคารวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

V_C = ปริมาตรของคอนกรีต

C_C = ราคาต่อหน่วยคอนกรีตรวมค่าแรง

W_{S1} = ปริมาณเหล็กเสริม

C_{S1} = ราคาต่อหน่วยเหล็กเสริมรวมค่าแรง

W_{S2} = ปริมาณเหล็กปลอก

C_{S2} = ราคาต่อหน่วยเหล็กปลอกรวมค่าแรง

A_F = ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต

C_F = ราคาแบบหล่อคอนกรีตรวมค่าแรง

ส่วนราคาวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 2 โดยราคาเหล่านี้สามารถกำหนดใหม่ได้ตามท้องตลาดหรือราคาในปัจจุบัน

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้าง

งานวิจัยนี้กำหนดให้น้ำหนักกระทำบนคานเป็นน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอ (W) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) ในการคำนวณหาแรงและโมเมนต์เทียบเท่า (f_{xy} , m_x) ด้วยวิธีงานเทียบเท่า (Work-Equivalence Method) จากนั้นจึงนำแรงและโมเมนต์ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [10,11] ตามสมการที่ (5),(6) และ (7) ซึ่งใช้สำหรับคาน 1,2 และ 3 ช่วงตามลำดับ

ตารางที่ 2 ราคาวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในการคำนวณ [8, 9]

กำลังอัดคอนกรีต f'_c (กก./ซม. ² .)	ราคา/หน่วย (บาท/ม. ³ .)	ค่าแรง (บาท)
180	2380	340
210	2514	340
240	2554	340
280	2620	340
300	2810	340
กำลังครากเหล็กเสริม f_y (กก./ซม. ² .)	ราคา/หน่วย (บาท/กก.)	ค่าแรง (บาท/กก.)
2400	28	3
3000	28	3
4000	30	3
แบบหล่อ	ราคา/หน่วย (บาท/ม. ² .)	ค่าแรง (บาท/ม. ² .)
แบบหล่อไม้	550	105

$$W_u = 1.4DL + 1.7LL \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} f_{1y} \\ m_1 \\ f_{2y} \\ m_2 \end{Bmatrix} = EI \begin{Bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} f_{1y} \\ m_1 \\ f_{2y} \\ m_2 \\ f_{3y} \\ m_3 \end{Bmatrix} = EI \begin{Bmatrix} \frac{12}{L_1^3} & \frac{6}{L_1^2} & \frac{-12}{L_1^3} & \frac{6}{L_1^2} & 0 & 0 \\ \frac{6}{L_1^2} & \frac{4}{L_1} & \frac{-6}{L_1^2} & \frac{2}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{-12}{L_1^3} & \frac{-6}{L_1^2} & \frac{12}{L_1^3} + \frac{12}{L_2^3} & \frac{6}{L_1^2} + \frac{-6}{L_2^2} & \frac{-12}{L_2^3} & \frac{6}{L_2^2} \\ \frac{6}{L_1^2} & \frac{2}{L_1} & \frac{-6}{L_1^2} + \frac{-6}{L_2^2} & \frac{4}{L_1} + \frac{4}{L_2} & \frac{-6}{L_2^2} & \frac{2}{L_2} \\ \frac{12}{L_1^3} & \frac{6}{L_1^2} & \frac{-12}{L_1^3} & \frac{6}{L_1^2} & \frac{12}{L_2^3} + \frac{12}{L_3^3} & \frac{-6}{L_2^2} + \frac{6}{L_3^2} \\ 0 & 0 & \frac{-12}{L_2^3} & \frac{-6}{L_2^2} & \frac{12}{L_2^3} + \frac{12}{L_3^3} & \frac{-6}{L_2^2} + \frac{-6}{L_3^2} \\ 0 & 0 & \frac{6}{L_2^2} & \frac{2}{L_2} & \frac{-6}{L_2^2} & \frac{4}{L_2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \\ v_3 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} f_{1y} \\ m_1 \\ f_{2y} \\ m_2 \\ f_{3y} \\ m_3 \\ f_{4y} \\ m_4 \end{Bmatrix} = EI \begin{Bmatrix} \frac{12}{L_1^3} & \frac{6}{L_1^2} & \frac{-12}{L_1^3} & \frac{6}{L_1^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6}{L_1^2} & \frac{4}{L_1} & \frac{-6}{L_1^2} & \frac{2}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-12}{L_1^3} & \frac{-6}{L_1^2} & \frac{12}{L_1^3} + \frac{12}{L_2^3} & \frac{6}{L_1^2} + \frac{-6}{L_2^2} & \frac{-12}{L_2^3} & \frac{6}{L_2^2} & 0 & 0 \\ \frac{6}{L_1^2} & \frac{2}{L_1} & \frac{-6}{L_1^2} + \frac{-6}{L_2^2} & \frac{4}{L_1} + \frac{4}{L_2} & \frac{-6}{L_2^2} & \frac{2}{L_2} & 0 & 0 \\ \frac{12}{L_1^3} & \frac{6}{L_1^2} & \frac{-12}{L_1^3} & \frac{6}{L_1^2} & \frac{12}{L_2^3} + \frac{12}{L_3^3} & \frac{-6}{L_2^2} + \frac{6}{L_3^2} & \frac{-12}{L_3^3} & \frac{6}{L_3^2} \\ 0 & 0 & \frac{-12}{L_2^3} & \frac{-6}{L_2^2} & \frac{12}{L_2^3} + \frac{12}{L_3^3} & \frac{-6}{L_2^2} + \frac{-6}{L_3^2} & \frac{12}{L_3^3} & \frac{-6}{L_3^2} \\ 0 & 0 & \frac{6}{L_2^2} & \frac{2}{L_2} & \frac{-6}{L_2^2} & \frac{4}{L_2} & \frac{-6}{L_3^2} & \frac{2}{L_3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-12}{L_3^3} & \frac{-6}{L_3^2} & \frac{12}{L_3^3} & \frac{-6}{L_3^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6}{L_3^2} & \frac{2}{L_3} & \frac{-6}{L_3^2} & \frac{4}{L_3} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \\ v_3 \\ \theta_3 \\ v_4 \\ \theta_4 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

โดยที่ E = โมดูลัสยืดหยุ่น
 I = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด
 f_{xy} = แรงเทียบเท่า ณ. จุดต่อพิกัด โดยที่ x เป็นเลขของจุดต่อพิกัด
 m_x = โมเมนต์เทียบเท่า ณ. จุดต่อพิกัด
 L = ความยาวแต่ละช่วงคาน
 ν = การเสียรูปในแนวตั้ง
 θ = การเสียรูปเชิงมุม

3.3 ข้อกำหนดการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลัง (วสท. 1008-38) [12] ตรวจสอบความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานตามสมการ (8), ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริมในคานตามสมการ (9), ตรวจสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนของหน้าตัดคานตามสมการ (10), ระยะห่างของเหล็กปลอกตามสมการ (11), การตรวจสอบความลึกน้อยสุดสำหรับคานช่วงเดียว (12), ตรวจสอบความลึกน้อยสุดสำหรับคานต่อเนื่องด้านเดียว (13) และตรวจสอบความลึกน้อยสุดของหน้าตัดสำหรับคานต่อเนื่องสองด้าน (14)

$$M_u \leq \phi M_n \quad (8)$$

$$\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \quad (9)$$

$$V_u \leq \phi V_n \quad (10)$$

$$S_{\min} \leq S_v \leq S_{\max} \quad (11)$$

$$H \leq L/16 + 0.4 + (f_y/6667) \quad (12)$$

$$H \leq L/18.5 + 0.4 + (f_y/6667) \quad (13)$$

$$H \leq L/21 + 0.4 + (f_y/6667) \quad (14)$$

3.4 การประยุกต์อัลกอริทึมจำลองการอบเหี่ยวร่วมกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยประยุกต์อัลกอริทึมจำลองการอบเหี่ยว ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนดังกล่าวได้ดังต่อไปนี้

1. กำหนดช่วงคานแต่ละช่วง, ความยาวคาน, น้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร, ค่า T_i เริ่มต้น, ค่า T_i สุดท้ายราคาวัสดุ และค่าแรง
2. สุ่มสถานะปัจจุบัน เป็นขั้นตอนการสุ่มตัวแปรประกอบด้วย f'_c , f_y , b , h , A_s และ A_v
3. วิเคราะห์โครงสร้างด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อหาโมเมนต์ดัด (M_u) และ แรงเฉือน (V_u)

4. คำนวณราคารวมของสถานะปัจจุบัน
 5. ตรวจสอบเงื่อนไขหัวข้อที่ 3.3 ถ้าผ่านเงื่อนไขทำขั้นตอนที่ 6 ถ้าไม่ผ่านทำขั้นตอนที่ 2
 6. สุ่มสถานะใหม่ f'_c, f_y, b, h, A_s และ A_v
 7. วิเคราะห์โครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาโมเมนต์ดัด (M_u) และแรงเฉือน (V_u)
 8. คำนวณราคารวมของสถานะใหม่
 9. ตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบในหัวข้อที่ 3.3 ถ้าผ่านเงื่อนไขทั้งหมดให้ดำเนินการต่อไปขั้นตอนที่ 10 ถ้าไม่ผ่านให้ดำเนินการขั้นตอนที่ 6
 10. เปรียบเทียบราคารวมของคานสถานะใหม่กับสถานะปัจจุบัน ถ้าคานสถานะใหม่มีราคาน้อยกว่าหรือเท่ากันให้ทำต่อขั้นตอนที่ 12 ถ้าคานสถานะใหม่มีราคาแพงกว่าคานสถานะปัจจุบันให้ดำเนินการขั้นตอนที่ 11
 11. คำนวณค่าผลต่างของราคาจากนั้นนำไปคำนวณค่า P ตามสมการที่ (1) ถ้า P มากกว่าหรือเท่ากับค่าสุ่มระหว่าง 0-1 ให้ทำขั้นตอนที่ 12 ถ้า P น้อยกว่าค่าสุ่มระหว่าง 0-1 ให้ทำขั้นตอนที่ 6
 12. กำหนดคานสถานะใหม่แทนที่คานสถานะปัจจุบัน
 13. ลดค่า T_i โดยใช้สมการที่ (2)
 14. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการทำงาน
 15. จบการทำงาน

3.5 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

งานวิจัยนี้ทดสอบด้วยคาน 1, 2 และ 3 ช่วง รวมทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ซึ่งแสดงในตารางที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
ตัวอย่างที่ 1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวยาว 5 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1500 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 3000 กก./ม. ตัวอย่างที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ช่วงยาว 5 และ 5 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1500 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1200 กก./ม. และช่วงที่ 2 รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1200 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1000 กก./ม. ตัวอย่างที่ 3 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ช่วงยาว 5, 3 และ 5 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1000 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1500 กก./ม. ช่วงที่ 2 รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1500 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1000 กก./ม. และช่วงที่ 3 รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1500 กก./ม. และ น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1500 กก./ม.

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกตัวอย่างทดสอบ [13, 14]

ตัวอย่าง ทดสอบ	คานช่วงที่ 1		คานช่วงที่ 2		คานช่วงที่ 3	
	DL	LL	DL	LL	DL	LL
1	1500	3000	-	-	-	-
2	1500	1200	1200	1000	-	-
3	1000	1500	1500	1000	1500	1500

หมายเหตุ : น้ำหนักบรรทุกหน่วยเป็น กก./ม.

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ตัวอย่าง

ตารางที่ 4 แสดงจำนวนรอบการคำนวณและเวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธี SA เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งรายละเอียดรอบการคำนวณและราคาได้จัดแสดงในรูปที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง

ราคารวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและจำนวนรอบการคำนวณของวิธีการ SA ในตัวอย่างที่ 1 คำนวณ 1547 รอบ ใช้เวลา 2.53 วินาที ตัวอย่างที่ 2 คำนวณ 1699 รอบ ใช้เวลา 4.21 วินาที และตัวอย่างที่ 3 คำนวณ 2509 รอบ ใช้เวลา 50.10 วินาที โดยใช้คอมพิวเตอร์ หน่วยประมวลผลกลางเป็น Intel Core i5 หน่วยความจำ 4 กิกะไบต์ ประมวลผลผ่านโปรแกรม MATLAB 2010a ด้วยระบบปฏิบัติการ Windows 7 (32 bits)

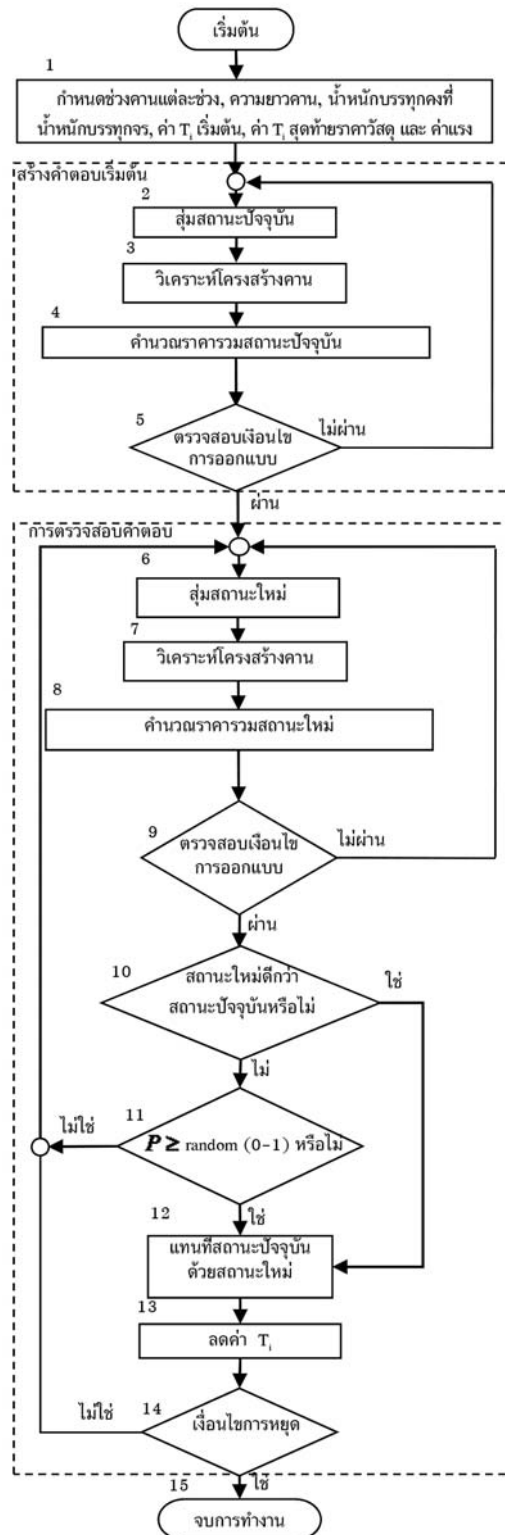
ตารางที่ 4 การคำนวณและเวลาที่ใช้ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3

รายละเอียด	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
การคำนวณ (รอบ)	1547	1699	2509
เวลา (วินาที)	2.53	4.21	50.10

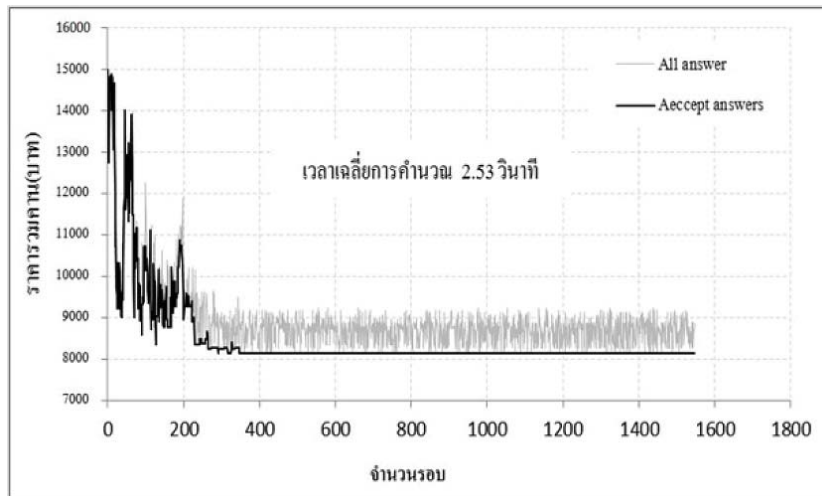
ตัวอย่างที่ 1 พบว่าโปรแกรมเลือกใช้ f_y สูงกว่าที่ออกแบบด้วยวิธีทั่วไป ทำให้ปริมาณการใช้เหล็กเสริมลดลง พื้นที่หน้าตัดของคานคอนกรีตลดลง และยังสามารถลด f'_c ลงได้อีก ซึ่งมีผลทำให้ราคาค่าใช้จ่ายต่างๆ ลดลงถึงแม้ว่าระยะของเหล็กปลอกจะถี่ขึ้นกว่าเดิมก็ตาม แต่ยังคงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ที่ใกล้เคียง (วสท. 1008-38) จากการคำนวณราคาเพื่อเปรียบเทียบโดยใช้ฐานข้อมูลที่ระบุในตารางที่ 2 พบว่าประหยัดกว่าหน้าตัดตัวอย่างเปรียบเทียบร้อยละ 10.10 ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลวิธีการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทั่วไปและวิธีการ SA ตัวอย่างที่ 1

รายละเอียด	รายการ	
	วิธีการแบบทั่วไป	วิธี SA
หน้าตัดคาน (B:H)	25 : 50	20:50
f'_c (กก./ซม ² .)	300	280
f_y (กก./ซม ² .)	3000	4000
เหล็กเสริมบน	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	5-DB25	2-DB25
	1-DB12	3-DB20
		1-DB12
Stirrup @ (cm)	DB10@20	RB6@10
Total cost (baht)	9342	8485
Diff cost (%)	10.10	



รูปที่ 2 ขั้นตอนการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการประยุกต์ใช้วิธีการ SA

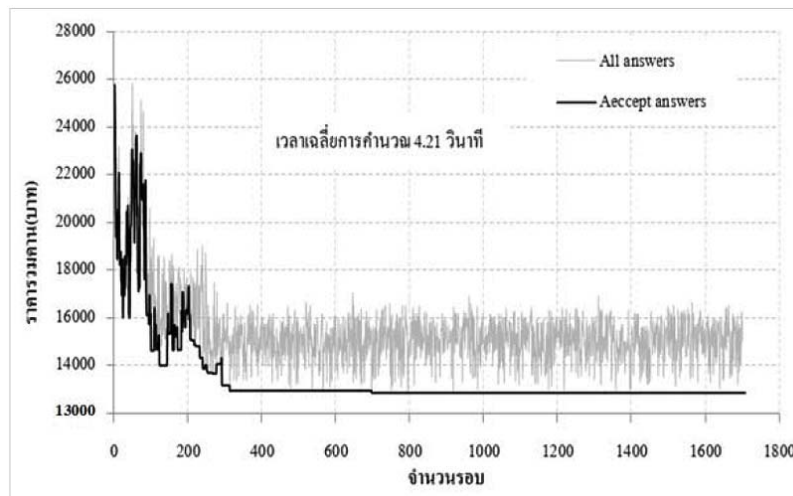


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างราคารวมคานคอนกรีตเสริมเหล็กและจำนวนรอบของวิธีการ SA ในตัวอย่างที่ 1

จากตารางที่ 6 ผลจากการออกแบบคานตัวอย่างที่ 2 ซึ่งเป็นคานต่อเนื่องสองช่วง พบว่าการออกแบบด้วย SA จะเลือกเหล็กที่มีสูงขึ้นทำให้สามารถใช้เหล็กเสริมน้อยลง และมีหน้าตัดคานที่เล็กลงเนื่องจากใช้ f'_c สูงขึ้น ระยะของเหล็กปลอกจะถี่ขึ้นกว่าเดิมเนื่องจากหน้าตัดคอนกรีตเล็กลงทำให้คอนกรีตช่วยต้านทานแรงเฉือนได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับหน้าตัดที่ออกแบบด้วยวิธีทั่วไป แต่เนื่องจากโปรแกรมผ่านการตรวจสอบเงื่อนไขตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีกำลังทำให้มั่นใจได้ว่าหน้าตัดออกแบบสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดได้อย่างปลอดภัย พบว่าราคาก่อสร้างถูกกว่าวิธีการแบบทั่วไปร้อยละ 12.57

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลวิธีการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทั่วไปและวิธีการ SA ตัวอย่างที่ 2

รายการ						
รายละเอียด	วิธีการแบบทั่วไป			วิธี SA		
	หน้าตัดที่1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3
หน้าตัดคค(B:H)	25:50	25:50	25:50	20:50	20:50	20:50
f'_c	210 (กก./ซม ² .)			240 (กก./ซม ² .)		
f_y	3000 (กก./ซม ² .)			4000 (กก./ซม ² .)		
เหล็กเสริมบน	2-DB16	3-DB16	2-DB16	2-DB12	8-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	2-DB16	3-DB12 2-DB16	2-DB16	3-DB12 2-DB12	2-DB12	3-DB12 2-DB12
Stirrup	RB9@25	-	RB9@25	RB9@20	-	RB6@15
Total(baht)	15413			13692		
Diff (%)	12.57					



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างราคารวมคานคอนกรีตเสริมเหล็กและจำนวนรอบของวิธีการ SA ในตัวอย่างที่ 2

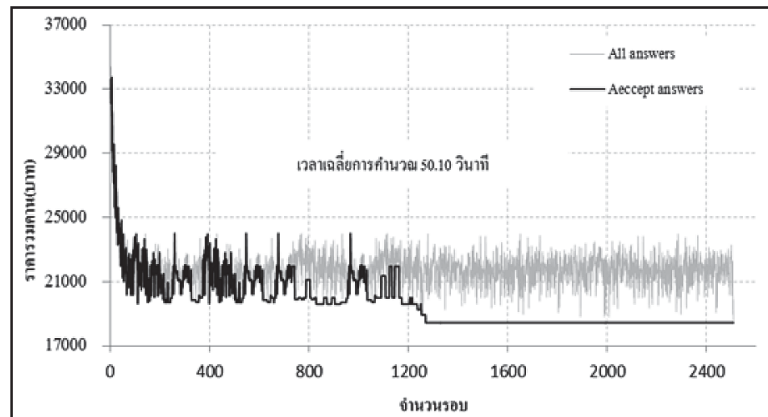
จากตัวอย่างที่ 3 ข้อมูลในตารางที่ 7 พบการออกแบบในลักษณะเดียวกันคือโปรแกรมเลือก f_y เท่ากับ 4000 กก./ชม.² เมื่อเทียบกับหน้าตัดที่ออกแบบด้วยวิธีทั่วไป ทำให้สามารถใช้ขนาดเหล็กเสริมที่เล็กลงและมีปริมาณการใช้เหล็กเสริมหลักลดลงตามไปด้วย พื้นที่หน้าตัดเล็กลงในขณะที่ f_c' ก็ลดลงแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่คำนวณด้วยวิธีทั่วไปมีการเผื่อกำลังรับแรงไว้ค่อนข้างมาก ระยะของเหล็กปลอกถี่ขึ้นกว่าเดิมเฉพาะในช่วงที่ 3 ในขณะที่ช่วงที่ 1 และ 2 มีการเสริมเหล็กปลอกที่เท่ากันจากการออกแบบทั้งสองวิธี เมื่อเปรียบเทียบราคาพบว่าหน้าตัดที่ออกแบบด้วย SA ประหยัดกว่าวิธีการแบบทั่วไปร้อยละ 13.23 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายิ่งคานที่ออกแบบยังมีหลายช่วงมากเท่าไรก็ยิ่งประหยัดค่าออกแบบได้เท่านั้น เนื่องจากสามารถประหยัดปริมาณคอนกรีต เหล็กเสริม และเหล็กปลอกได้เพิ่มขึ้นตามความยาวคานรวมที่เพิ่มขึ้น

5. สรุป

จากการทดสอบในตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่าหลักการของขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมโดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แน่นอนคือ ราคาต่ำสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีราคารวมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงร้อยละ 10.10, 12.56 และ 13.23 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีทั่วไป ถึงแม้ว่าจะมีจำนวนรอบการคำนวณที่มากแต่ระยะเวลาที่ใช้ก็นับว่า น้อยมากสำหรับงานการออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งคำตอบทุกคำตอบที่ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวค้นหานั้นล้วนแล้วแต่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างเหมาะสมปลอดภัยอีกทั้งยังมีราคาค่าก่อสร้างที่ถูกลง

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลวิธีการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบทั่วไปและวิธีการ SA ตัวอย่างที่ 3

รายการ					
วิธีการแบบทั่วไป					
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3	หน้าตัดที่ 4	หน้าตัดที่ 5
(B:H)	25 : 50	25 : 50	25 : 50	25 : 50	25 : 50
f'_c	280 (กก./ชม ² .)				
f_y	3000 (กก./ชม ² .)				
เหล็กเสริมบน	2-DB20	2-DB20 1-DB20	2-DB20	2-DB20 3-DB20	2-DB20
เหล็กเสริมล่าง	2-DB20 1-DB20	2-DB20	2-DB20	2-DB20	2-DB20 3-DB20
Stirrup @ (cm)	RB9 @ 20		RB9 @ 20		RB9 @ 20
Total (baht)	20887				
วิธี SA					
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3	หน้าตัดที่ 4	หน้าตัดที่ 5
(B:H)	20 : 50	20 : 50	20 : 50	20 : 50	20 : 50
f'_c	240 (กก./ชม ² .)				
f_y	4000 (กก./ชม ² .)				
เหล็กเสริมบน	2-DB16	4-DB16	2-DB16	2-DB16	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	2-DB16 3-DB12	2-DB16	4-DB16	2-DB16	2-DB16 4-DB12
Stirrup @ (cm)	RB9 @ 20		RB9 @ 20		RB9 @ 15
Total (baht)	18445				
Diff (%)	13.23				



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างราคารวมคานคอนกรีตเสริมเหล็กและจำนวนรอบของวิธีการ SA ในตัวอย่าง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบคุณห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับการสนับสนุนในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nimitawa, A. & Nanakorn, P. (2010). A genetic algorithm for beam-slab layout design of rectilinear floors. *Engineering Structures* 32, 3488-3500.
- [2] Cheng, J. (2010). Optimum design of steel truss arch bridges using a hybrid genetic algorithm. *Journal of Constructional Steel Research* 66, 1011-1017.
- [3] Noilublao, N. & Bureerat, S. (2011). Simultaneous topology, shape and sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms. *Computers and Structures* 89, 2531-2538.
- [4] Paya-Zaforteza, I. (2009). CO₂-Optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures* 31, 1501-1508.
- [5] Lamberti, L. (2008). An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures. *Computers and Structures* 86, 1936-1953.
- [6] Kirkpatrick, C. D., Gelatl, Jr. & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Journal of Science* 220, 671-680.
- [7] Bohachevsky, L., Johnson, M. E. & Stein, M. L. (1986). Generalized simulated annealing for function optimization. *Technometrics* 2, No. 4, 209-217.
- [8] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. แนวทางการวัดปริมาณงานก่อสร้างอาคาร, วสท., กรุงเทพฯ, 2548.
- [9] คณะกรรมการกำกับนโยบายราคางานก่อสร้าง กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง. บัญชีค่าแรงงาน/ดำเนินการสำหรับการถอดแบบคำนวณราคาผลงาน, กรุงเทพฯ, 2555.
- [10] เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพฯ, กรุงเทพฯ, 2548.
- [11] Bathe K. J. *Finite Element Procedure in Engineering Analysis*. Prentice Hall, New Jersey, 1996
- [12] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. วสท., กรุงเทพฯ, 2545.
- [13] สำเริง รักซ้อน. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีกำลังและหน่วยแรงใช้งาน, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ, 2552.
- [14] มงคล จิรวัชรเดช. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 4. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549.

