

การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วยฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

Optimum Design of Reinforced Concrete Stairs Using Hill Climbing Algorithm

กิตติศักดิ์ บรรณสาร และ อลงกรณ์ ละม่อม*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ขามเรียง กันทรวิชัย มหาสารคาม 44150

Kittisak Bannasarn and Alongkorn Lamom*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University,

Khamreiyng, Kantarawichai, Mahasarakham, 44150, Thailand

*Corresponding Author E-mail: alongkorn_lamom@hotmail.com

Received: Sep 8, 2022; Revised: Nov 4, 2022; Accepted: Jan 10, 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เสนอการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมโดยใช้วิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท. 011007-19) การออกแบบจะคำนวณหาขนาดลูกตั้ง ลูกนอน ความหนาพื้นบันได ปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสม คำนวณราคารวมของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กจากราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงาน การทดลองจะเปรียบเทียบระหว่างวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมกับวิธีการคำนวณแบบทั่วไป ผลการศึกษาพบว่าวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมสามารถใช้สำหรับการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมได้ดีกว่าวิธีการคำนวณแบบทั่วไป ซึ่งผลการออกแบบของวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึม ได้ขนาดความหนาพื้นบันไดที่น้อยกว่า ปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยกว่า ส่งผลให้มีราคารวมที่ต่ำกว่า คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.81 นอกจากนี้แล้ววิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึมยังสามารถใช้ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างรวดเร็ว มีหน้าตัดที่เหมาะสม และเสริมเหล็กได้อัตโนมัติ โดยไม่ต้องการประสบการณ์หรือความชำนาญของผู้ออกแบบ

คำสำคัญ: การออกแบบอย่างเหมาะสม, ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม, การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก, วิธีหน่วยแรงใช้งาน

Abstract

This research proposes the optimal design of reinforced concrete stairs using the Hill Climbing Algorithm. The stairs were designed by the working stress design method of the Engineering Institute of Thailand (EIT Standard 011007-19). The design calculated the size of the riser, the tread, the thickness of the waist slab, the optimum steel reinforcement, and the total price of reinforced concrete stairs from the construction material and labor cost. The experiment compared the Hill Climbing Algorithm and the conventional calculation method. The results showed that the use of the Hill Climbing Algorithm for the proper design of reinforced concrete stairs was better than conventional calculation methods. The Hill Climbing Algorithm resulted in a smaller thickness of waist slab with less steel reinforcement. As a result, the total price was lower than conventional calculation methods, representing an average of 4.81%. In addition, the Hill Climbing Algorithm can quickly design reinforced concrete stairs with suitable cross-sectional dimensions and reinforcing steel automatically and does not require the experience or expertise of the designer.

Keyword: Optimum Design, Hill Climbing Algorithm, Reinforced Concrete Stair, Working Stress Design

1. บทนำ

บันได (Stair) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของอาคาร ถูกสร้างขึ้นเพื่อจุดประสงค์ในการเชื่อมต่อชั้นต่างๆ ของอาคาร ใช้สำหรับการสัญจรและขนส่งสิ่งของระหว่างชั้น และเป็นส่วนสำคัญที่ทุกคนต้องใช้เป็นประจำ ดังนั้นการออกแบบบันไดจึงต้องออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัยผ่านเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามการออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีคำนวณมือทั่วไป เมื่อคำนวณน้อยก็จะได้การออกแบบที่เปลือง หากคำนวณมากก็ใช้เวลาและเสี่ยงกับความผิดพลาด จึงได้มีผู้นำอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Algorithm) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างอาคาร เพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างอาคารที่มีค่าก่อสร้างที่ต่ำ สามารถออกแบบได้อัตโนมัติ รวดเร็วและแม่นยำ

สำหรับการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมมีงานวิจัยหลายเรื่องที่เกี่ยวข้อง อาทิ เมื่อปี ค.ศ. 2005 Govindaraj และ Ramasamy [1] ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) สำหรับการออกแบบรายละเอียดที่เหมาะสมที่สุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่องตามข้อกำหนดมาตรฐานของอินเดีย ต่อมา ในปี ค.ศ. 2010 Cheng [2] ได้นำเจเนติกอัลกอริทึมแบบลูกผสม (Hybrid Genetic Algorithm, GA) มาใช้ในการออกแบบสะพานโครงสร้างเหล็กแบบโค้ง ในปี ค.ศ. 2011 Patchotichai และ Lamom [3] นำอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Algorithm, BA) และฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึม (Hill Climbing Algorithm, HCA) มาใช้ในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และในปี ค.ศ. 2012 Tapown และคณะ [4] ใช้ HCA ซิมูเลเต็ดแอนนีลลิงอัลกอริทึม (Simulated Annealing Algorithm, SA) และเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 Juisuwannathat และ Smittakorn [5] ได้นำอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และในปีเดียวกัน Techaratanaprasert และ Smittakorn [6] นำวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (Harmony Search Algorithm, HA) มาออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ต่อมาในปี ค.ศ. 2015

Prakobkit และ Smittakorn [7] นำอัลกอริทึมหิ่งห้อย (Firefly Algorithm, FA) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าตอบอย่างเหมาะสมแบบฮิวริสติก ที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากการใช้แสงในการหาคู่และหาอาหารของหิ่งห้อย ออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในปี ค.ศ. 2021 Tapown และ Cheerarot [8] นำการค้นหาแบบแมลงหวี่ (Fruit Fly Optimization, FOA) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก และในปีเดียวกัน Chomchuen และ Lamom [9] ประยุกต์ใช้ HCA สำหรับออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม ในปี ค.ศ. 2022 Azizi และคณะ [10] ได้นำวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (Tribe-Harmony Search, Tribe - HS) มาออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างอาคารสูงและอาคารต่ำ

แม้จะมีอัลกอริทึมหลากหลายวิธี [1–10] ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง แต่วิธี HCA ก็เป็นอีกวิธีที่มีขั้นตอนการทำงานที่ไม่ซับซ้อน พัฒนาง่าย มีประสิทธิภาพที่ดี มีการทำงานที่รวดเร็ว เป็นอัตโนมัติและไม่จำเป็นต้องพึ่งประสบการณ์หรือความเชี่ยวชาญของผู้ออกแบบ อีกทั้งยังไม่พบงานวิจัยที่มีการนำวิธี HCA มาใช้ออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้วิธี HCA เพื่อนำมาใช้ออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม โดยใช้มาตรฐานการออกแบบของ วสท. 011007-19 [11] วิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการยอมรับในระดับสากลและมีการใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อคำนวณหาขนาดลูกตั้ง ลูกนอน ความหนาพื้นบันได ปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสม โดยงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกแบบระหว่าง วิธี HCA กับวิธีการคำนวณแบบทั่วไป (Conventional Calculation Method, CM)

2. ทฤษฎีการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก

บันได (Stair) [12] ใช้เป็นทางขึ้นลงระหว่างชั้นต่างๆ ในอาคาร ส่วนใหญ่มักเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวที่อยู่ในแนวเอียงและมีคานรองรับระหว่างช่วง โดยทำผิวบนของแผ่นพื้นให้เป็นขั้นบันได ส่วนผิวล่างของแผ่นพื้นอาจเป็นแบบเรียบหรือหยักไปตามขั้นบันไดก็ได้

ปกติส่วนกว้างของชั้นบันได (ลูกนอน) ประมาณ 25–30 ซม. และส่วนยกของชั้นบันได (ลูกตั้ง) ประมาณ 15–18 ซม. โดยมีความสูงระหว่างช่วงไม่เกิน 4 ม. ทั้งนี้เพื่อให้การขึ้นลงสะดวกไม่ชันจนเกินไป

การคำนวณออกแบบบันได คสล. เหมือนกับการออกแบบแผ่นพื้น คสล. ซึ่งประกอบด้วยภาระน้ำหนักบรรทุก โมเมนต์ดัด แรงเฉือน แรงยึดเหนี่ยวและโมเมนต์บิด (ถ้ามี) ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะของคานแม่บันไดที่รองรับแผ่นพื้นบันไดนั้น เหล็กเสริมที่ใช้ในแผ่นพื้นบันไดมีทั้งเหล็กเสริมเอกเพื่อรับโมเมนต์ดัดและเหล็กเสริมกันร้าวเพื่อต้านทานการยืดหดตัวของคอนกรีตนอกจากนี้อาจมีเหล็กยึดขึ้นทางยาวที่ติดตั้งไปตามชั้นของบันไดและมีเหล็กเสริมที่แต่ละมุมของชั้นบันไดเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตที่ผิวบน อันเนื่องมาจากการยืดหดตัวของคอนกรีต

2.1 บันไดแบบพาดทางช่วงยาว

บันไดแบบพาดทางช่วงยาวแบบพื้นต้นจะมีคานรองรับทั้งสองด้านของช่วงยาวของบันได ถ้าบันไดเป็นแบบไม่มีชานพัก คานรองรับอาจเป็นคานพื้นชั้นล่างกับคานพื้นชั้นบน แต่ถ้าบันไดเป็นแบบมีชานพัก คานรองรับอาจเป็นคานพื้นชั้นล่างหรือคานพื้นชั้นบนกับคานชานพักที่อยู่ระหว่างพื้นชั้นล่างกับพื้นชั้นบน ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับการออกแบบแผ่นพื้นบันไดแบบนี้ พิจารณาให้ช่วงยาวระหว่างคานรองรับเป็นแบบช่วงเดียวธรรมดา (Simple Supported) และคำนวณหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน โดยพิจารณาจากระยะช่วงว่างในแนวราบระหว่างคานที่รองรับนั้น ซึ่งการเสริมเหล็กในแผ่นพื้นบันไดแบบนี้จะเหมือนกับการเสริมเหล็กในแผ่นพื้น คสล. ทางเดียว โดยมีเหล็กเสริมเอกวางอยู่ทางด้านล่างตามแนวยาวของพื้นบันไดและฝังยึดเข้าไปในคานที่รองรับ

อนึ่ง เมื่อพิจารณาออกแบบให้ขอบปลายยึดแน่นกับคานที่รองรับจะต้องล้วงเหล็กบนเข้าไปในคานรองรับและให้มีระยะฝังยึดอย่างเพียงพอ เพื่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวตามต้องการ ส่วนเหล็กทางขวางที่ตั้งฉากกับเหล็กเสริมเอกให้ใช้ตามอัตราส่วนของเหล็กด้านการยึดหดตัว นอกจากนี้ อาจพิจารณาใช้เหล็กยึดขึ้นบันไดทางยาวที่ติดตั้งไปตามชั้นของบันไดโดยมีเหล็กเสริมที่แต่ละมุมที่ดัดเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต



รูปที่ 1 บันไดแบบพาดทางยาว

2.2 สมมุติฐานที่ใช้ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD)

การคำนวณออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) อาศัยข้อสมมุติฐาน [12] ที่คำนึงถึงพฤติกรรมยืดหยุ่นของส่วน โครงสร้าง คสล. ในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ดังต่อไปนี้

- 1) ระบายของหน้าตัดก่อนและหลังการรับแรงดัดจะยังคงระนาบเดิม โดยความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน
- 2) ขณะรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินหน่วยแรงที่ยอมให้โดยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของคอนกรีตให้ถือว่าเส้นตรง
- 3) ให้เหล็กเสริมรับแรงดึงทั้งหมดที่เกิดจากการดัด
- 4) ให้แทนที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึงด้วยหน้าตัดคอนกรีตซึ่งมีเนื้อที่ n เท่าของหน้าตัดเหล็กเสริม
- 5) ความเครียดสูงสุดที่ขอบนอกสุดด้านรับแรงอัดของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $\epsilon_u = 0.003$ หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมต้องไม่เกินกำลังคราก ดังสมการที่ (1)–(3)

$$f_s = E_s \epsilon_s \quad (1)$$

เมื่อ $\epsilon_s < \epsilon_y$

$$f_s = f_y \quad (2)$$

เมื่อ $\epsilon_s \geq \epsilon_y$

$$\varepsilon_y = f_y/E_s \quad (3)$$

เมื่อ

f_y คือ หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม(กก./ชม.²)

f_s คือ หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม(กก./ชม.²)

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม(กก./ชม.²)

ε_s คือ หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึง(มม./มม.)

ε_y คือ หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมที่จุดคราก(มม./มม.)

6) บันไดคอนกรีตเสริมเหล็กจะออกแบบคล้ายกับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยที่น้ำหนักของบันไดจะถ่ายลงแกนคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป การออกแบบจึงจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆ ในการออกแบบ ดังต่อไปนี้

6.1) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c)

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นตัวบ่งบอกหรือแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูป (Deformation) ของวัสดุ เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุก มาตรฐาน วสท.011007-19 [11] กำหนดสูตรสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยขึ้นกับกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ดังสมการที่ (4)–(5)

$$E_c = 4,270W_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

เมื่อ

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (กก./ชม.²)

W_c คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (กก./ม.³)

f'_c คือ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน เมื่ออายุ 28 วัน (กก./ชม.²)

ดังนั้น สำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาใช้หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2.323 (ตัน/ม.³) [11]

จะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

$$E_c = 15,120\sqrt{f'_c} \quad (5)$$

6.2) โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก (E_s)

สำหรับเหล็กเสริมทุกชั้นคุณภาพจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E_s เท่ากับ 2.04×10^6 กก./ชม.²

6.3) อัตราส่วนโมดูลัส ดังสมการที่ (6)

$$n = E_s/E_c \quad (6)$$

อาจใช้เป็นเลขจำนวนเต็มทีใกล้เคียงที่สุดแต่ต้องไม่ต่ำกว่า 6

2.3 ขั้นตอนการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบพาดทางช่วงยาว

1) กำหนดค่า f'_c และ f_y เพื่อหาค่า f_c และ f_s

f_c คือ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $0.375f'_c$ ไม่เกิน 65 กก./ชม.²

โดย f'_c คือ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน เมื่ออายุ 28 วัน (กก./ชม.²)

สำหรับเหล็กเส้นกลม ชั้นคุณภาพ SR24 $f_s = 0.5f_y$ ไม่เกิน 1,200 กก./ชม.²

สำหรับเหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD30 $f_s = 0.5f_y$ ไม่เกิน 1,500 กก./ชม.²

สำหรับเหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD40 f_s ไม่เกิน 1,700 กก./ชม.²

โดย f_y คือ หน่วยแรงดึงครากของเหล็กเสริม (กก./ชม.²)

2) หาขนาดชั้นบันไดและความหนาของพื้นบันไดดังสมการที่ (7)–(10)

$$S_r = H/N_r \quad (7)$$

$$N_t = N_r - 1 \quad (8)$$

$$T_h = L - N_t \quad (9)$$

$$T_{less} = F \quad (10)$$

เมื่อ S_r คือ ขนาดความสูงของลูกตั้ง(ชม.)

H คือ ความสูงระหว่างพื้นชั้นล่างถึงชานพักบันได (ชม.)

N_r คือ จำนวนของลูกตั้ง (ชั้น)

N_t คือ จำนวนลูกนอน (ชั้น)

T_h คือ ขนาดความกว้างของลูกนอน (ชม.)

T_{less} คือ ความหนาต่ำสุดของพื้นบันได (ชม.)

L คือ ความยาวของบันได(ไม่รวมชานพักบันได) (ชม.)

F คือ ค่าจากตารางที่ 1 (ชม.)

ตารางที่ 1 ความหนาที่ต่ำสุดของแผ่นพื้นบันไดที่ไม่ได้คำนวณระยะแอ่น

องค์ อาคาร	ความหนาที่ต่ำสุดที่กำหนดให้			
	ช่วง เดียว	ปลาย ต่อเนื่อง ด้านเดียว	ปลาย ต่อเนื่อง สองด้าน	ปลาย ยื่น
แผ่นพื้น	L/20	L/24	L/28	L/10

3) หาน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวราบ [13] ดังสมการที่ (11)

$$W_t = W_r + W_s + W_u \quad (11)$$

เมื่อ W_t คือ น้ำหนักรวมของบันได หน่วยเป็น กก./ม.²

น้ำหนักขั้นบันได $W_r = 12S_r$; กก./ม.²

น้ำหนักพื้นบันได $W_s = \frac{24(S) \sqrt{S_r^2 - Th^2}}{Th}$; กก./ม.²

W_u คือ น้ำหนักบรรทุกจร (กก./ม.²)

S_r คือ ขนาดความสูงของลูกตั้ง(ชม.)

S คือ ความหนาของพื้นบันได (ชม.)

4) ตรวจสอบความหนาของพื้นบันได ดังสมการที่ (12)–(17)

$$J = 1 - \frac{k}{3} \quad (12)$$

$$k = 1 / \left(1 + \frac{f_s}{n f_c} \right) \quad (13)$$

$$R = \frac{1}{2} f_c j k \quad (14)$$

$$M = \frac{w_t L^2}{8} \quad (15)$$

เมื่อ M คือ โมเมนต์สูงสุดของบันได(กก.-ม.)

คำนวณค่าความลึกประสิทธิภาพที่ต้องการ

$$d = \sqrt{\frac{M}{Rb}} \quad (16)$$

$$d_r = S - C - \frac{Dia}{2} \quad (17)$$

เมื่อ d คือ ความลึกประสิทธิภาพที่ต้องการ(ชม.)

b คือ ความกว้างที่พิจารณาเท่ากับ 1 ม.

d_r คือ ความลึกประสิทธิภาพจริง(ชม.)

C คือ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (ชม.)

Dia คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม (ชม.)

ถ้าหาก d_r มากกว่า d ถือว่ามีความปลอดภัย

5) ตรวจสอบแรงเฉือน (V, V_c หน่วยเป็น กก.)

แรงเฉือน ณ หน้าตัดวิกฤติ $V = W_t \left(\frac{L}{2} - \frac{d}{100} \right)$ แรงเฉือนที่
พื้นคอนกรีตรับได้ $V_c = 0.29 \sqrt{f'_c} b d$

6) หาปริมาณเหล็กเสริม

$A_s = M(100)/(f_s j d)$ เมื่อ A_s คือ ปริมาณเหล็กเสริม
หน่วยเป็น ชม.²/ม.

7) กำหนดหาปริมาณของเหล็กกันยึดหด (A_{st})

กรณีใช้เหล็กเส้นกลม(SR24) $A_{st} = 0.0025 b S$ กรณี
ใช้เหล็กเส้นข้ออ้อย(SD30) $A_{st} = 0.0020 b S$ กรณีใช้
เหล็กเส้นข้ออ้อย(SD40) $A_{st} = 0.0018 b S$ เมื่อ A_{st} คือ
ปริมาณเหล็กกันยึดหด หน่วยเป็น ชม.²/ม.

3. ฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึม

ฮิลล์ไคลมิงอัลกอริทึม (Hill Climbing Algorithm, HCA) ได้มีการนำเสนอเป็นครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1984 [14] โดย Pearl ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาข้อมูลที่มีลักษณะเหมือนการปีนเขาของนักปีนเขาเพื่อค้นหาเส้นทางไปยังยอดเขาโดยเร็วที่สุด ด้วยวิธีการวางเป้าหมายเริ่มต้นเป็นยอดเขาแล้วค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด เพื่อการเดินทางไปยังยอดเขาโดยใช้เวลาที่สั้นที่สุด อัลกอริทึมนี้เป็นวิธีการหาสถานะเป้าหมายหรือสถานะที่ดีที่สุด ที่หาคำตอบเชิงฮิวริสติก(Heuristic Search) เช่นเดียวกับ เจเนติกอัลกอริทึม(Genetic Algorithm) ซึ่งกำลังนิยมใช้ในการแก้ปัญหาในด้านความเหมาะสมหลายๆ ปัญหา เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม สำหรับค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุด หาคำตอบเชิงกราฟ (Graph Search Algorithm) คล้ายการได้ขึ้นเขาและลงจากเขาในแนวตั้งตลอด

4. ขั้นตอนการทำงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการเสนอแนวทางการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม โดยใช้วิธี HCA ด้วยการคำนวณราคารวมของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก จากราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงานต่ำสุด ซึ่งขั้นตอนการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมถูกพัฒนาโดยใช้

โปรแกรม Microsoft visual basic 6.0 พัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณและค้นหาคำตอบโดยการยกตัวอย่างการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดแตกต่างกัน

เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย คือ คอมพิวเตอร์ และโปรแกรมถูกพัฒนากระบวนการหาคำตอบ โดยมีคุณสมบัติของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการ (Microsoft windows 10) หน่วยประมวลผลกลาง Intel(R)Core(TM)i7-7700HQ CPU @ 2.80 GHz หน่วยความจำแรม 12.0 GB (11.9 GB usable) ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนากระบวนการหาคำตอบคือ Microsoft Visual Basic 6.0 โดยใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ Visual Basic

4.1 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD)
- 2) กำหนดค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต 180, 210, 240, 280, 300 และ 320 กก./ชม.²
- 3) เหล็กเสริมเอกที่ใช้เป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาด 12, 16, 20, 25 และ 28 มม. ส่วนเหล็กเส้นกลม ขนาด 6 และ 9 มม.
- 4) กำหนดค่ากำลังครากของเหล็กข้ออ้อย 3,000 และ 4,000 กก./ชม.² และ เหล็กเส้นกลม 2,400 กก./ชม.²
- 5) กำหนดความสูงของชั้นบันไดลูกตั้งไม่เกิน 20 ซม. ความกว้างของชั้นบันไดลูกนอนไม่น้อยกว่า 25 ซม. และความหนาพื้นบันไดชั้นต่ำเท่ากับความยาว/20 ซม. ชั้นสูงไม่เกิน 30 ซม.
- 6) กำหนดค่าความสูงของเสา 1.35, 1.60 และ 1.85 ม.
- 7) กำหนดค่าความกว้างของบันได 1 ม.
- 8) กำหนดค่าความยาวของบันได 3, 4 และ 5 ม.
- 9) กำหนดน้ำหนักบรรทุกคงที่อื่นๆ เท่ากับ 100 กก./ม.²

10) การออกแบบบันไดพาตทางช่วงยาวท้องเรียบ

4.2 สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายของการศึกษานี้ คือ สมการที่ให้ผลรวมราคาวัสดุของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งได้แก่ ค่าคอนกรีต เหล็กเสริมคอนกรีตและปริมาณแบบหล่อคอนกรีต รวมกันแล้วต้องมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (18)

$$f(x) = \min \sum (V_c C_c + W_s C_s + V_F C_F) \quad (18)$$

เมื่อ $f(x)$ คือ ราคารวมของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก(บาท)

V_c คือ ปริมาตรของคอนกรีต(ม.³)

C_c คือ ราคาของคอนกรีต(บาท/ม.³)

W_s คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม(กก.)

C_s คือ ราคาของเหล็กเสริม(บาท/กก.)

V_F คือ ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต(ม.)

C_F คือ ราคาของแบบหล่อคอนกรีต(บาท/ม.²)

4.3 ราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดใช้ราคาวัสดุเฉพาะพื้นที่และราคาของวัสดุก่อสร้าง โดยในแต่ละรายการนั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่

1) ราคาคอนกรีต

ราคาคอนกรีตที่ใช้เป็นราคาคอนกรีตผสมเสร็จไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม จากสำนักงานพาณิชย์จังหวัดมหาสารคาม ประจำเดือนกุมภาพันธ์ 2565[15] และค่าแรงงานตามบัญชีค่าแรงงาน/ดำเนินการสำหรับการถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้างออกตามประกาศคณะกรรมการราคากลางและขึ้นทะเบียนผู้ประกอบการ เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการกำหนดราคากลางงานก่อสร้าง ณ วันที่ 19 ตุลาคม 2560 [16] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ราคาคอนกรีตผสมเสร็จและค่าแรงงาน

คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอกมาตรฐาน)			
กำลังอัดประลัยคอนกรีตรูปทรงกระบอก, f'_c (กก./ชม. ²)	ราคา (บาท/ม. ³)	ค่าแรงงาน (บาท/ม. ³)	รวม (บาท/ม. ³)
180	1,960	391	2,351
210	2,000	391	2,391
240	2,040	391	2,431

ตารางที่ 2 ราคาคอนกรีตผสมเสร็จและค่าแรงงาน(ต่อ)

คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอกมาตรฐาน)			
กำลังอัดประลัยคอนกรีตรูปทรงกระบอก, f'_c (กก./ชม. ²)	ราคา (บาท/ม. ³)	ค่าแรงงาน (บาท/ม. ³)	รวม (บาท/ม. ³)
280	2,120	391	2,511
300	2,160	391	2,551
320	2,200	391	2,591

หมายเหตุ 1. ราคาสินค้าเฉลี่ยวัสดุก่อสร้าง (ราคาเงินสด ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม ไม่รวมค่าขนส่ง) ของจังหวัดมหาสารคาม เดือนกุมภาพันธ์ ปี 2565 [15]

2. ค่าแรงงานสำหรับโครงสร้างและส่วนประกอบอาคารชั้นเดียว [16]

2) ราคาเหล็กเสริมคอนกรีต

ราคาเหล็กเสริมคอนกรีตต่อหน่วย(กิโลกรัม) คำนวณจากราคาเหล็กเสริมคอนกรีตแต่ละประเภทตามกำลังครากของเหล็กเสริมคอนกรีต คือ 2,400 3,000 และ 4,000 กก./ชม.² และค่าแรงงานในการตัด คัด และผูกเหล็กเสริมคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 3

3) ราคาแบบหล่อคอนกรีต

ราคาวัสดุหล่อคอนกรีตเป็นไม้แบบหล่อคอนกรีต ราคา 637 บาท/ม.² ราคาแรงงานติดตั้งแบบหล่อคอนกรีต คัดกรณิแบบหล่อคอนกรีตทั่วไปที่ติดตั้งน้อยกว่า 5,000 ม.² ราคา 133 บาท/ม.² รวมเป็นเงิน 770 บาท/ม.² โดยรายละเอียดของราคาไม้แบบหล่อคอนกรีตทั่วไปเฉลี่ยใช้งาน 80% ต่อ ม.² ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ราคาและค่าแรงงานในการตัด คัด และผูกเหล็กเสริมคอนกรีต

ราคาและค่าแรงงานในการตัด คัด และผูกเหล็กเสริมคอนกรีต			
ชนิดเหล็กเสริมคอนกรีต	ราคา(บาท/กก.)	ค่าแรงงาน(บาท/กก.)	รวม(บาท/กก.)
เหล็กเส้นกลม SR24	29.23	4.10	33.33
เหล็กข้ออ้อย SD30	27.89	3.30	31.19
เหล็กข้ออ้อย SD40	27.89	3.30	31.19

หมายเหตุ 1. ราคาสินค้าเฉลี่ยวัสดุก่อสร้าง (ราคาเงินสด ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม ไม่รวมค่าขนส่ง) ของจังหวัดมหาสารคาม เดือนกุมภาพันธ์ ปี 2565[15]

2. ราคาเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นราคาเฉลี่ย

3. ค่าแรงงานสำหรับเหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 10 มม.[16]

4. ค่าแรงงานสำหรับ เหล็กเส้นกลม / เหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 10 มม. ถึง 16 มม.[16]

4.4 รูปแบบของการเสริมเหล็กของโปรแกรมที่พัฒนา

โดยเหล็กเสริมในบันไดจะประกอบด้วยเหล็กยึดชั้นบันได และเหล็กเสริมในพื้นบันได ซึ่งมีลักษณะคล้ายในพื้นปกติ คือ มีลักษณะวางเป็นตะแกรง โดยเหล็กเสริมเอกจะอยู่ในทิศทางขนานกับช่วงการรับน้ำหนักระหว่างแม่บันไดที่รองรับ ส่วน

เหล็กเสริมกันยัดหคจะใช้เพื่อป้องกันการแตกร้าวและช่วยยึดเหล็กเสริมเอกให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ

ในกรณีของบันไดลาดทางช่วงยาวระหว่างคานแม่บันไดต่างระดับความสูง เหล็กเสริมเอกจะเป็นเส้นอยู่ล่างสุด เพื่อให้มีความลึกประสิทธิภาพในการต้านทานโมเมนต์ดัด ส่วนเหล็กเสริมกันยัดหคจะเป็นจุดวงกลมวางบนเหล็กเสริมเอก

- 4) ตรวจสอบว่าสถานะใหม่ดีกว่าสถานะเดิมหรือไม่
- 5) ถ้าหากไม่ใช่ สถานะใหม่จะถูกปฏิเสธแล้วให้วนกลับไปทำใน ขั้นตอน ที่ 3
- 6) หากใช่ กำหนดสถานะใหม่เป็นสถานะปัจจุบัน
- 7) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด (3,000 รอบ) ถ้าเข้าเงื่อนไขการหยุดที่กำหนดไว้ การทำงานเมื่อครบรอบตามที่กำหนดไว้ ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดไว้ที่ 3,000 รอบ หากไม่ใช่ ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3

สำหรับการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กในการทดลองนี้ กำหนดให้สถานะต่างๆ เป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

สถานะเริ่มต้น คือ กำหนดความหนาพื้นบันไดที่หนา มาก ขนาดเหล็กเสริมที่ใหญ่และปริมาณเหล็กเสริมจำนวนมาก

สถานะใหม่ คือ ความหนาพื้นบันได ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม หลังจากการสุมแล้วคำนวณหาโมเมนต์ที่เกิดขึ้นและผ่านการตรวจสอบความมั่นคงแข็งแรง คำนวณหาราคารวมแล้วได้ราคารวมที่ต่ำกว่าความหนาของพื้นบันไดในสถานะเดิม

สถานะเดิม คือ ความหนาพื้นบันได ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม ก่อนการสุม

สถานะปัจจุบัน คือ ความหนาพื้นบันได ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม หลังจากการสุมแล้วคำนวณหาโมเมนต์ที่เกิดขึ้นและผ่านการตรวจสอบความมั่นคงแข็งแรง คำนวณหาราคารวมแล้วได้ราคารวมที่ต่ำที่สุดในขณะนั้น คำตอบที่เหมาะสม คือ คำตอบที่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบและมีราคาต่ำที่สุด

5. ตัวอย่างการทดลอง

งานวิจัยนี้ทดลองด้วยการระบุค่า น้ำหนักบรรทุกจร ความยาวขานพักบันได ความยาวช่วงบันไดและความสูงของบันได ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยคำนวณบันไดที่มีความกว้าง 1 ม. และความหนาของคานรองรับบันได 0.15 ม. กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกคงที่อื่นๆ เท่ากับ 100 กก./ม.² การออกแบบนี้จึงเป็นการคำนวณเพื่อหาขนาดลูกตั้ง ลูกนอน ความหนาพื้นบันได และปริมาณเหล็กเสริมที่

เหมาะสม โดยการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ด้วยการนำ HCA มาช่วยในการทำงานซึ่งกำหนดจำนวนรอบเพื่อเป็นเงื่อนไขในการหยุดการทำงานเพื่อทราบถึงจำนวนครั้งที่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของแต่ละตัวอย่าง โดยมีตัวอย่างการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวอย่างทดลองการออกแบบบันได คสล.

ตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุกจร (กก./ม. ²)	ความยาวขานพักบันได (ม.)	ความยาวช่วงบันได (ม.)	ความสูงบันได (ม.)
1	300	1.00	3.00	1.35
2	400	1.50	4.00	1.60
3	500	2.00	5.00	1.85

ผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการหาคำตอบของวิธี HCA จะนำผลของคำตอบที่ได้จากการคำนวณ จำนวนรอบในการหาคำตอบทั้งหมดที่ใช้ในการหาคำตอบมาเปรียบเทียบกับวิธี CM โดยการคำนวณทั้งสองวิธีจะใช้เงื่อนไขในการออกแบบเดียวกัน เพื่อศึกษาถึงผลกระทบการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างรวมค่าแรงงานต่อราคาค่าสุดท้ายสำหรับออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม

6. ผลการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาจากตัวอย่างการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวนทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยทั้ง 3 ตัวอย่าง กำหนดใช้เหล็กเสริม SD30 และใช้ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีตรูปทรงกระบอก (f_c') เท่ากับ 180 กก./ซม.²

6.1 ตัวอย่างการทดลองที่ 1

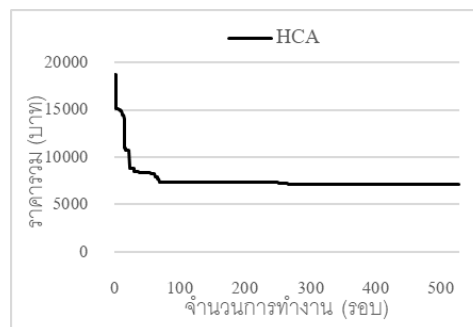
จากตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ 1 กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจร 300 กก./ม.² ความยาวขานพักบันได 1.00 ม. ความยาวช่วงบันได 3.00 ม. ความสูงบันได 1.35 ม. ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบผลการออกแบบด้วยวิธี HCA กับวิธี CM

รายการ	1	
	HCA	CM
พื้นหนา(ซม.)	14	15
ขนาดลูกตั้ง(ซม.)	16.88	16.88
ขนาดลูกนอน(ซม.)	28.57	28.57
เหล็กเสริมเอก	DB12 @0.15ม.	DB12 @0.125 ม.
เหล็กเสริมกันยึดหด	RB9 @0.20ม.	RB9 @0.15ม.
เหล็กเสริมชั้นบันได	RB9 @0.20ม.	RB9 @0.15ม.
เหล็กเสริมมุมชั้นบันได(ท่อน)	14-RB9	14-RB9
ราคารวม(บาท)	7,123.02	7,468.66
ร้อยละความแตกต่างราคา (%)	4.63	

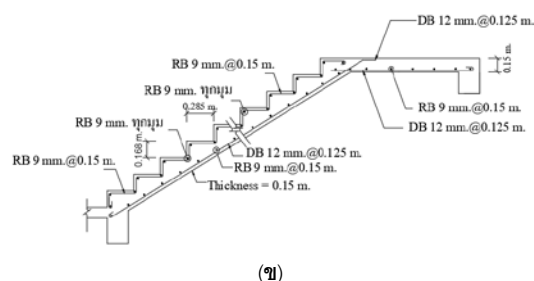
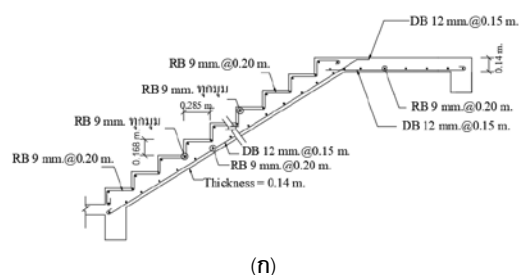
จากตารางที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กของตัวอย่างที่ 1 ด้วยวิธี HCA กับวิธี CM จากผลการศึกษาพบว่าบันไดที่ออกแบบด้วยวิธี HCA มีราคารวมต่ำกว่าบันไดที่ออกแบบด้วยวิธี CM คิดเป็นร้อยละ 4.63

จากรูปที่ 4 การลู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 1 ใช้จำนวนการทำงานในการค้นหาคำตอบจำนวน 266 รอบ หากพิจารณาจากเส้นกราฟระหว่างราคารวมและจำนวนการทำงาน ซึ่งเป็นผลของการออกแบบที่ผ่านเงื่อนไขสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน วสท.011007-19 [11] ซึ่งจะเห็นว่าเส้นของกราฟมีแนวโน้มลดลงในทุกรอบของการทำงาน แสดงให้เห็นว่าในทุกรอบของการออกแบบจะได้หน้าตัดที่มีความปลอดภัยและมีความประหยัด มีการค้นหาคำตอบที่มีความปลอดภัยและประหยัดในทุกรอบของการทำงาน จนกว่าจะไม่พบหน้าตัดที่ต้องการซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงท้ายของการทำงาน ก่อนที่จะมีการหยุดการทำงานในที่สุด



รูปที่ 4 การลู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 1

จากการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 1 มีรายละเอียดขนาดของหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 5 (ก)-(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 5 รายละเอียดขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับตัวอย่างที่ 1 (ก) กรณีการออกแบบด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 1 (ข) กรณีการออกแบบด้วยวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 1

6.2 ตัวอย่างการทดลองที่ 2

จากตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ 2 กำหนดให้หน้าหนักบรทุกจร 400 กก./ม.² ความยาวขานพักบันได 1.50 ม. ความยาวช่วงบันได 4.00 ม. ความสูงบันได 1.60 ม. ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM ดังแสดงในตารางที่ 7

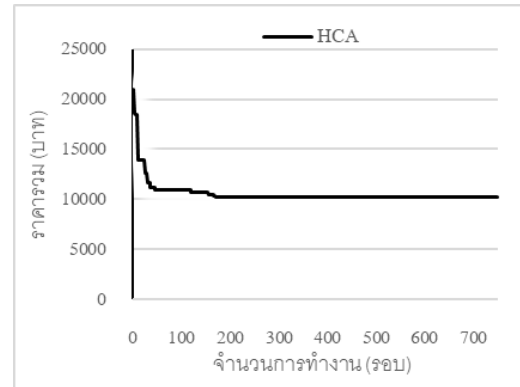
จากตารางที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบของตัวอย่างที่ 2 ด้วยวิธี HCA กับวิธี CM จากผลการศึกษาพบว่าวิธี HCA มีราคารวมต่ำกว่าวิธี CM คิดเป็นร้อยละ 4.80

จากรูปที่ 6 การลู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 2 ใช้จำนวนการทำงานในการค้นหาค่าตอบจำนวน 710 รอบ หากพิจารณาจากเส้นกราฟระหว่างราคารวมและจำนวนการทำงาน ซึ่งเป็นผลของการออกแบบที่ผ่านเงื่อนไขสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน วสท.011007-19 [11] ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของกราฟมีความคล้ายกับตัวอย่างที่ 1 โดยเส้นของกราฟมีแนวโน้มลดลงในทุกรอบของการทำงาน แสดงให้เห็นว่าในทุกรอบของการออกแบบจะได้หน้าตัดที่มีความปลอดภัยและมีความประหยัด มีการค้นหาค่าตอบที่มีความปลอดภัยและประหยัดในทุกรอบของการทำงาน จนกว่าจะไม่พบหน้าตัดที่ต้องการซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงท้ายของการทำงานก่อนที่จะมีการหยุดการทำงานในที่สุด

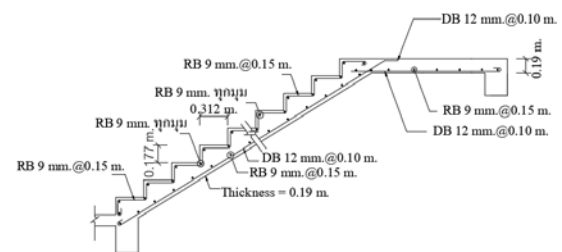
จากการออกแบบด้วยวิธี HCA และวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 2 มีรายละเอียดขนาดของหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงในรูปที่ 7(ก)-(ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลการออกแบบด้วยวิธี HCA กับวิธี CM

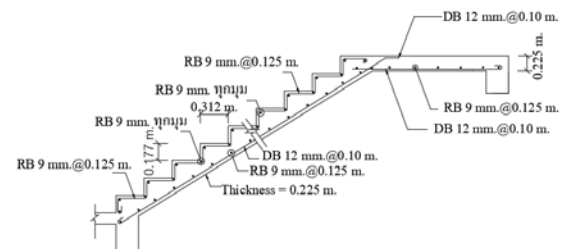
รายการ	2	
	HCA	CM
พื้นหนา(ซม.)	19	22.5
ขนาดลูกตั้ง(ซม.)	17.78	17.78
ขนาดลูกนอน(ซม.)	31.25	31.25
เหล็กเสริมเอก	DB12 @0.10ม.	DB12 @0.10ม.
เหล็กเสริมกันยัดหด	RB9 @0.15ม.	RB9 @0.125ม.
เหล็กเสริมชั้นบันได	RB9 @0.15ม.	RB9 @0.125ม.
เหล็กเสริมมุมชั้นบันได (ท่อน)	16-RB9	16-RB9
ราคารวม(บาท)	10,183.52	10,697.39
ร้อยละความแตกต่างราคา (%)	4.80	



รูปที่ 6 การลู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 รายละเอียดขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับตัวอย่างที่ 2 (ก) กรณีการออกแบบด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 2 (ข) กรณีการออกแบบด้วยวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 2

6.3 ตัวอย่างการทดลองที่ 3

จากตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ 3 กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจร 500 กก./ม.² ความยาวฐานพักบันได 2.00 ม. ความยาวช่วงบันได 5.00 ม. ความสูงบันได 1.85 ม. ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM ดังแสดงในตารางที่ 8

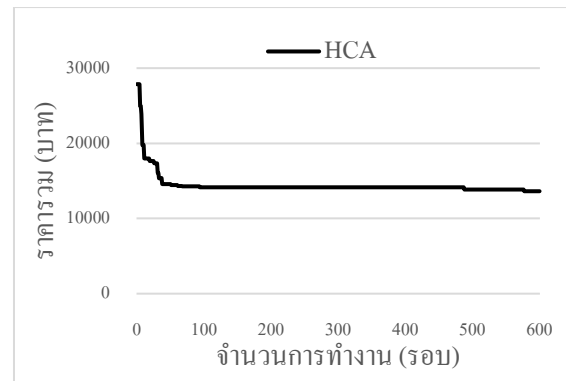
จากตารางที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบของตัวอย่างที่ 3 ด้วยวิธี HCA กับวิธี CM จากผลการศึกษา

พบว่าวิธี HCA มีราคารวมต่ำกว่าวิธี CM คิดเป็นร้อยละ 5.00

จากรูปที่ 8 การคู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 3 ใช้จำนวนการทำงานในการค้นหาคำตอบจำนวน 577 รอบ หากพิจารณาจากเส้นกราฟระหว่างราคารวมและจำนวนการทำงาน ซึ่งเป็นผลของการออกแบบที่ผ่านเงื่อนไขสำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน วสท.011007-19 [11] ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของกราฟมีความคล้ายกับตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ซึ่งเส้นของกราฟมีแนวโน้มการลดลงในทุกรอบของการทำงาน แสดงให้เห็นว่าในทุกรอบของการออกแบบจะได้หน้าตัดที่มีความปลอดภัยและมีความประหยัด มีการค้นหาคำตอบที่มีความปลอดภัยและประหยัดในทุกรอบของการทำงาน จนกว่าจะไม่พบหน้าตัดที่ต้องการซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงท้ายของการทำงานก่อนที่จะมีการหยุดการทำงานในที่สุด

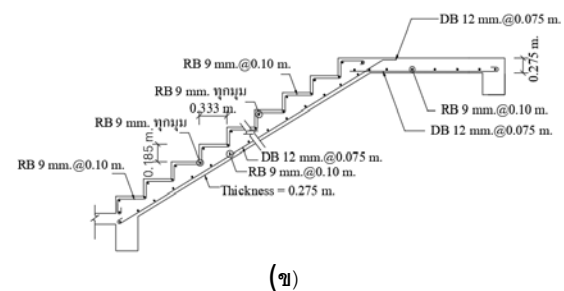
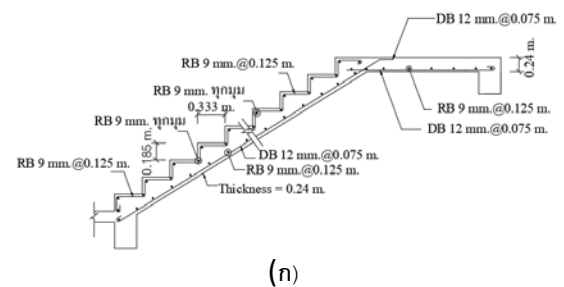
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลการออกแบบด้วยวิธี HCA กับวิธี CM

รายการ	3	
	HCA	CM
พื้นหนา(ซม.)	24	27.5
ขนาดลูกตั้ง(ซม.)	18.50	18.50
ขนาดลูกนอน(ซม.)	33.33	33.33
เหล็กเสริมเอก	DB12 @0.075ม.	DB12 @0.075ม.
เหล็กเสริมกันยึดหด	RB9 @0.125ม.	RB9 @0.10ม.
เหล็กเสริมชั้นบันได	RB9 @0.125ม.	RB9 @0.10ม.
เหล็กเสริมมุม ชั้นบันได(ท่อน)	18-RB9	18-RB9
ราคารวม(บาท)	13,626.26	14,343.86
ร้อยละความแตกต่าง ราคา (%)	5.00	



รูปที่ 8 การคู่เข้าหาราคารวมที่ต่ำที่สุดด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 3

จากการออกแบบด้วยวิธี HCA และวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 3 มีรายละเอียดขนาดของหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงในรูปที่ 9(ก)-(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 9 รายละเอียดขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กบันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับตัวอย่างที่ (ก) กรณีการออกแบบด้วยวิธี HCA สำหรับตัวอย่างที่ 3 (ข) กรณีการออกแบบด้วยวิธี CM สำหรับตัวอย่างที่ 3

7. อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี HCA และวิธี CM โดยกำหนดเงื่อนไข การออกแบบตามมาตรฐาน วสท.011007-19 [11] เพื่อให้บันไดคอนกรีต

เสริมเหล็กมีราคาต่ำสุดแต่ยังคงมีความมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัยต่อการใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณในทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่าบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบด้วยวิธี HCA มีราคารวมต่ำกว่าบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบด้วยวิธี CM คิดเป็นร้อยละ 4.63, 4.80 และ 5.00 ตามลำดับ โดยคำตอบของการคำนวณด้วยวิธี HCA จะมีการหาค่าตอบที่มีราคาต่ำที่สุดแต่ยังคงแข็งแรงยังคงเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด การค้นหาคำตอบของวิธี HCA จะเข้าสู่ค่าตอบที่มีค่าต่ำกว่าเสมอ นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้วิธี HCA ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วเป็นอัตโนมัติและไม่จำเป็นต้องพึ่งประสบการณ์หรือความเชี่ยวชาญของผู้ออกแบบ

8. สรุปผลการทดลอง

การทดลองใช้วิธี HCA สำหรับการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบกับวิธี CM พบว่าสามารถใช้วิธี HCA สำหรับการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมได้ดีกว่า ซึ่งผลการออกแบบของวิธี HCA ได้ขนาดของหน้าตัดบันไดที่เล็กกว่า ปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยกว่า ส่งผลให้มีราคารวมที่ต่ำกว่า คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.81 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธี HCA ให้ผลลัพธ์จากการออกแบบที่ประหยัดและมีกระบวนการออกแบบที่รวดเร็วกว่าวิธี CM ดังนั้น จึงสามารถที่จะนำวิธี HCA มาใช้ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างเหมาะสม

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] V. Govindaraj and J. V. Ramasamy, "Optimum detailed design of reinforced concrete continuous

beams using Genetic Algorithms," *Computers and Structures*, vol. 84, no. 1–2, pp. 34–48, 2005, doi: 10.1016/j.compstruc.2005.09.001.

[2] J. Cheng, "Optimum design of steel truss arch bridges using a hybrid genetic algorithm," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, no. 8–9, pp. 1011–1017, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.03.007.

[3] S. Patchotichai, N. Jitrapinat and A. Lamom, "Optimum Design of Axial Loaded Reinforced Concrete Column Using Bisection Algorithm," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 28, no. 3, September 2011.9

[4] A. Tapown, A. Lamom and R. Cheerarot, "Optimal Design of Biaxial Reinforced Concrete Rectangular Column by Heuristic Algorithm," M.S. thesis, Dept. Civil. Eng, Mahasarakham Univ., Mahasarakham, Thailand, 2012.

[5] S. Juisuwannathat and W. Smittakorn, "Optimal Design of Reinforced Concrete Building by Simulated Annealing Algorithm," M.S. thesis, Dept. Civil. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2014.

[6] A. Techaratanaprasert and W. Smittakorn, "Optimum Design of Reinforced Concrete Building by Harmony Search Algorithm," M.S. thesis, Dept. Civil. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2014.

[7] E. Prakobkit and W. Smittakorn, "Application of Firefly Algorithm to Optimum Design of Reinforced Concrete Structures," M.S. thesis, Dept. Civil. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2015.

[8] A. Tapown and R. Cheerarot, "Optimum Design of Reinforced Concrete Foundations by Fruit fly Optimization Algorithm," *The journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, pp.16–24, 2021.

[9] S. Chomchuen and A. Lamom, "Optimum Design of Prestressed Concrete Plank Girder Using Hill

- Climbling Algorithm,” *UBU Engineering Journal*, vol. 14, no. 14, pp.129–140, 2021.
- [10] M. Azizi, S. Talatahari, M. Basiri and M. B. Shishehgharkhaneh, “Optimal design of low- and high-rise building structures by Tribe- Harmony Search algorithm,” *Decision Analytics Journal*, vol. 3, 2022, Art. no. 100067, doi: 10.1016/j.dajour.2022.100067
- [11] *Building Code Requirements for Reinforced Concrete Working Stress Design Method*, EIT Standard 011007-19, The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King’s Patronage, Bangkok, Thailand, 2019
- [12] V. Chorwichian, “Reinforced Concrete Stairs,” in *Reinforced Concrete Design (Working Stress Design:WSD)*, Bangkok, Thailand: P.S. Commercial Ltd., Part., 1999, ch. 7, sec. 7.1-7.5, pp. 203–213
- [13] C. Jarujinda, “Reinforced Concrete Stairs,” in *Reinforced Concrete Design*, Bangkok, Thailand: Bunloet Printing House, 1999, ch. 4, sec. 1, pp. 69–81
- [14] J. Pearl, “Basic Heuristic-Search Procedures,” in *Heuristic: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*, Reding, MA, USA: Addison–Wesley Publishing Co., 1984, ch. 2, sec. 2.1, pp. 35–36
- [15] Construction material prices, Department of Trade Policy and Strategy. Ministry of Commerce. [Online]. Available http://www.indexpr.moc.go.th/PRICE_PRESENT/Select_month_regionCsi.asp?region=22022
- [16] Labor cost according to the labor/operational book value for taking off the mid-price calculation for construction, The comptroller general’s Department, , Bangkok, Thailand, 2017.