

การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน ในการออกแบบระบบพื้นคอมโพสิต

Application of Teaching-learning-based optimization for design of composite floor system

สิทธิศักดิ์ อันสนั่น¹, อัสนัย ทาภา² และ เรืองรุชต์ ชีระโรจน์^{1,*}

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ขามเรียง กันทรวิชัย มหาสารคาม 44150

²สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น ในเมือง
เมืองขอนแก่น ขอนแก่น 40000

Sittisak Ansanan¹, Assanai Tapao² and Raungrut Cheerarot^{1,*}

¹Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kham Rieng, Kantharawichai,
Mahasarakham, 44150, Thailand

²Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen,
Nai Mueang, Muang, Khon Kaen, 40000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: raungrut.c@msu.ac.th

Received: Aug 02, 2022; Revised: Oct 18, 2022; Accepted: Oct 26, 2022

บทคัดย่อ

พื้นคอมโพสิตถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานโครงสร้างอาคารเนื่องจากความประหยัด แต่ในการออกแบบพื้นคอมโพสิตให้มีความประหยัดนั้นค่อนข้างยากและซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน (TLBO) ในการออกแบบที่ประหยัดของระบบพื้นคอมโพสิตตามมาตรฐาน AISC วิธีคำนวณต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (LRFD) ซึ่งขั้นตอนวิธีสำหรับออกแบบถูกพัฒนาโดยใช้ภาษา Visual basic โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบคือราคารวมที่ต่ำที่สุด และตรวจสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี TLBO ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยตัวอย่างการออกแบบพื้นคอมโพสิตจากงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวน 3 ตัวอย่าง จากผลการทดสอบพบว่าขั้นตอนวิธี TLBO มีการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมอย่างรวดเร็วโดยใช้จำนวนการประเมินฟังก์ชันที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีอื่นๆ และสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่ดีกว่างานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบกับอยู่ในช่วงร้อยละ 0.61–14.9

คำสำคัญ: ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน, การออกแบบระบบพื้นคอมโพสิต, การออกแบบที่เหมาะสม

Abstract

Composite floors are widely used in building structures due to their economy, but an economical design of composite floors is rather difficult and complicated. Therefore, this research presents the application of Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) to design the optimum of composite floor system according Load and Resistance Factor Design method (LRFD) by AISC standard. This design algorithm is developed using Visual basic language to determine the lowest total cost of structures. The efficiency of the TLBO for search the optimal solution is tested by three composite floor examples from the literature. The test results show that the

TLBO answer converges quickly to the optimal solution with fewer function evaluations compared to other algorithms and the TLBO found the optimal solution better than the compared research in the range of 0.61–14.9%

Keywords: Teaching-learning-based optimization, Design of composite floor system, Optimum design

1. บทนำ

ระบบพื้นคอมโพสิตคือพื้นที่ประกอบด้วยส่วนของคอนกรีตที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นพื้น และส่วนของคานเหล็ก รูปพรรณที่รองรับแผ่นพื้นคอนกรีต ซึ่งทั้งสองส่วนจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันสลักรับแรงเฉือนเพื่อทำให้ระบบพื้นมีพฤติกรรมเชิงประกอบ เมื่อมีโมเมนต์คดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกมากระทำ ระบบพื้นคอมโพสิตอาจทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่หรือทั้งหมดของแผ่นพื้นคอนกรีตรับแรงอัด และพื้นที่ส่วนใหญ่หรือทั้งหมดของคานเหล็กรูปพรรณรับแรงดึง ดังนั้นคานเหล็กรูปพรรณจึงสามารถต้านทานโมเมนต์คดได้มากขึ้น นอกจากนี้ระบบพื้นคอมโพสิตยังแข็งแรงและเบากว่าระบบพื้นอื่น ๆ มาก ซึ่งสิ่งนี้อาจทำให้โครงสร้างอื่นๆ ที่รองรับน้ำหนักของแผ่นพื้นรวมทั้งฐานรากมีขนาดเล็กลงด้วย และข้อได้เปรียบหลักของพื้นคอมโพสิตเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นระบบอื่นๆ คือพื้นคอมโพสิตก่อสร้างได้ง่ายและรวดเร็วกว่า [1] สำหรับในการออกแบบระบบพื้นประเภทนี้ผู้ออกแบบจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์ของตนเพื่อที่จะกำหนดค่ากำลังอัดของคอนกรีต ความหนาของแผ่นพื้น ขนาดหน้าตัดและระยะห่างของคานเหล็กรูปพรรณ และจำนวนสลักรับแรงเฉือน ที่สามารถต้านทานโมเมนต์คดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัย ซึ่งขั้นตอนนี้จะดำเนินการผ่านกระบวนการลองผิดลองถูก (Trial and error) หลายครั้ง เนื่องจากตำแหน่งของแกนกลางคาน (Plastic neutral axis) อาจเกิดขึ้นภายในพื้นคอนกรีต ปีกหรือเอวของคานเหล็ก ดังนั้นจึงค่อนข้างยากในการกำหนดค่าต่างๆ ของตัวแปรการออกแบบ เพราะค่าของตัวแปรการออกแบบหนึ่งจะส่งผลต่อค่าตัวแปรการออกแบบอื่นๆ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่า การออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตนั้นค่อนข้างที่จะซับซ้อน [2] และผลการออกแบบที่ได้อาจไม่ใช่ค่าที่ประหยัดที่สุด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization technique) จึงถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว โดยขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติก (Meta-heuristic algorithms) เป็น

หนึ่งในเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่มีลักษณะการค้นหาคำตอบที่เป็นแบบสุ่มที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการแก้ปัญหาการออกแบบที่เหมาะสมทางวิศวกรรม เนื่องจากมีแนวคิดที่ค่อนข้างเรียบง่ายและสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยเทคนิคนี้จะเป็นการเลียนแบบปรากฏการณ์ทางกายภาพ พฤติกรรมแบบกลุ่มของสัตว์ หรือกฎการวิวัฒนาการในธรรมชาติ [3] สำหรับขั้นตอนวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบพื้นคอมโพสิตได้แก่ ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) [4] ที่เลียนแบบวิธีการคัดเลือกในธรรมชาติ เพื่อให้กำเนิดลูกหลานที่มีความสามารถ และให้เผ่าพันธุ์คงอยู่ต่อไป ขั้นตอนวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (Harmony search algorithm: HS) และขั้นตอนวิธีฮาร์โมนีเสิร์ชที่ได้รับการปรับปรุง (Improved harmony search algorithm: IHS) [5] ที่เลียนแบบกระบวนการในการค้นหาความกลมกลืนของเสียงของนักดนตรี ซึ่งอัลกอริทึมเหล่านี้ให้ผลการออกแบบที่เหมาะสมที่ประหยัดขึ้นตามลำดับ

ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน (Teaching-learning-based optimization: TLBO) เป็นหนึ่งในเทคนิคเมตาฮิวริสติก ที่เลียนแบบกระบวนการเรียนการสอนระหว่างครูและนักเรียนในชั้นเรียน [6] ซึ่งครูพยายามให้ความรู้แก่นักเรียนเพื่อเพิ่มระดับความรู้ของทั้งชั้นเรียนตามความสามารถของตน ครูที่เก่งกว่าจะสามารถยกระดับความรู้ของนักเรียนได้มากกว่า และนักเรียนยังมีการเรียนรู้เพิ่มเติมจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันและกันเพื่อที่จะพัฒนาความรู้ของตนเอง สำหรับในการหาค่าที่เหมาะสม ตัวแปรการตัดสินใจจะเปรียบเสมือนวิชาเรียนของนักเรียน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเปรียบเสมือนคะแนนหรือเกรดเฉลี่ยที่นักเรียนได้รับ และนักเรียนที่มีเกรดเฉลี่ยที่ดีที่สุดหรือมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดจะถูกกำหนดให้เป็นครูและถ่ายทอดความรู้ของตนให้กับนักเรียนคนอื่นๆ โดยขั้นตอนวิธี TLBO มีข้อได้เปรียบเหนือขั้นตอนวิธีอื่นๆ คือ สามารถทำงานได้โดยใช้เฉพาะพารามิเตอร์ควบคุมทั่วไปเท่านั้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ควบคุมเฉพาะ ด้วยสิ่งนี้ทำให้

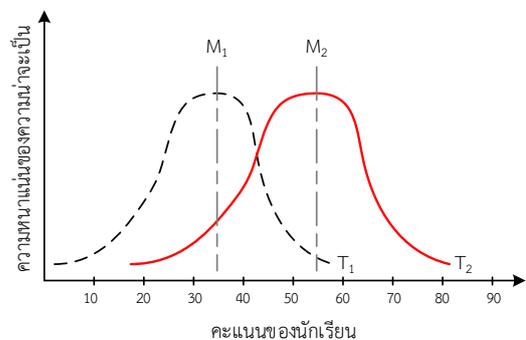
อัลกอริทึม TLBO ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาต่างๆ ตัวอย่างเช่น Togan [7] ได้นำขั้นตอนวิธี TLBO มาใช้สำหรับการออกแบบโครงข้อแข็งเหล็กที่มีน้ำหนักรวมของโครงสร้างที่น้อยที่สุด ซึ่งพบว่าผลการออกแบบของขั้นตอนวิธี TLBO มีน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่นๆ ที่เปรียบเทียบ Degertekin และ Hayalioglu [8] ได้ออกแบบโครงถักที่เหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธี TLBO โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะหาขนาดหน้าตัดของแต่ละชิ้นส่วนที่ทำให้น้ำหนักรวมของโครงถักมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งพบว่าขั้นตอนวิธี TLBO ค้นพบคำตอบที่มีน้ำหนักน้อยกว่าและมีลักษณะการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่เร็วกว่าขั้นตอนวิธีอื่นๆ Öztürk และคณะ [9] นำขั้นตอนวิธี TLBO มาใช้สำหรับออกแบบกำแพงกันดินแบบเคาเตอร์ฟอร์ทที่มีต้นทุนการก่อสร้างที่ประหยัดที่สุด ซึ่งพบว่าขั้นตอนวิธี TLBO ค้นพบคำตอบที่มีต้นทุนที่ประหยัดกว่าและมีผลลัพธ์ทางสถิติที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ และ Rout และคณะ [10] วางแผนเส้นทางออฟไลน์ (Offline trajectory) ที่เหมาะสมที่สุดของหุ่นยนต์เชื่อมโดยใช้ขั้นตอนวิธี TLBO ซึ่งพบว่าคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี TLBO ใช้เวลาในการเดินทางที่น้อยกว่าขั้นตอนวิธีอื่นๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ

ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ การออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตนั้นค่อนข้างที่จะซับซ้อนกว่าการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทอื่นๆ ซึ่งผู้ออกแบบจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์ของตนเพื่อที่จะกำหนดค่าของตัวแปรการออกแบบที่มีผลกระทบต่อกันและกัน อีกทั้งผลการออกแบบที่ได้อาจไม่ใช่ค่าที่ประหยัดที่สุด จึงจำเป็นต้องใช้ขั้นตอนวิธีที่มีศักยภาพที่สูงกว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้โดยทั่วไป และจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธี TLBO มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการออกแบบที่เหมาะสมทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อน และยังไม่มีการนำขั้นตอนวิธี TLBO มาใช้สำหรับออกแบบระบบพื้นคอมโพสิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี TLBO สำหรับออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตเพื่อหาต้นทุนรวมในการก่อสร้างที่ประหยัดที่สุด ตามมาตรฐาน AISC วิธีคำนวณต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (LRFD) [11]

และใช้วิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก (Plastic stress distribution method) ในการวิเคราะห์กำลังรับโมเมนต์คดของหน้าตัด จากนั้นทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการออกแบบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีนี้ โดยเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมกับตัวอย่างการทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ตัวอย่าง [5],[12]

2. ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน

ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนรู้การสอน (Teaching-learning-based optimization: TLBO) เป็นการเรียนรู้แบบกระบวนการเรียนรู้การสอนระหว่างครูและนักเรียนเรียนในชั้นเรียน ซึ่งนำเสนอโดย Rao และคณะในปี ค.ศ. 2011 [6] โดยครูพยายามให้ความรู้แก่หมู่นักเรียนเพื่อเพิ่มระดับความรู้ของทั้งชั้นเรียนและช่วยให้นักเรียนได้คะแนนหรือเกรดที่ดีขึ้น ดังนั้นครูจึงเพิ่มค่าเฉลี่ยของชั้นเรียนตามความสามารถของตน โดยครูที่มีความรู้มากกว่าจะสามารถยกระดับความรู้ของนักเรียนได้มากกว่าดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสมมติให้ครู T_2 มีความรู้มากกว่าครู T_1 ดังนั้นระดับคะแนนเฉลี่ยของนักเรียน M_2 ที่สอนโดยครู T_2 จึงสูงกว่าระดับคะแนนเฉลี่ยของนักเรียนเรียน M_1 ที่สอนโดยครู T_1 และนอกจากการเรียนรู้จากครูแล้วนักเรียนยังมีการเรียนรู้เพิ่มเติมจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันและกัน ทำให้ระดับความรู้เฉลี่ยของนักเรียนในชั้นเรียนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งตามแนวคิดนี้แบบจำลองของขั้นตอนวิธี TLBO ทางคณิตศาสตร์จะประกอบด้วย 2 ระยะ คือ ระยะการสอน (Teaching phase) และระยะการเรียนรู้ (Learning phase)



รูปที่ 1 ระดับคะแนนเฉลี่ยของนักเรียนที่สอนโดยครู T_1 และ T_2

2.1.ระยะการสอน

ในการหาค่าที่เหมาะสมจะกำหนดคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดเป็นครู และครูจะพยายามปรับปรุงคำตอบเฉลี่ยของนักเรียนไปยังคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ซึ่งคำตอบใหม่สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$X_{new,i} = X_i + r(X_{teacher} - T_F X_{mean}) \quad (1)$$

โดยที่ $X_{new,i}$ และ X_i คือ คำตอบใหม่และคำตอบปัจจุบันของนักเรียน i ตามลำดับ $X_{teacher}$ คือ คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดซึ่งกำหนดให้เป็นครู X_{mean} คือ คำตอบเฉลี่ยของนักเรียนทั้งหมด r คือ ตัวเลขสุ่มระหว่าง $[0, 1]$ และ T_F คือ เฟคเตอร์การสอน (Teaching factor) ซึ่งมีค่าเป็น 1 หรือ 2 [6] หากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(X_{new,i})$ น้อยกว่า $f(X_i)$ ให้แทนที่คำตอบ X_i ด้วย $X_{new,i}$

2.2.ระยะการเรียนรู้

ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นักเรียนยังสามารถปรับปรุงความรู้โดยอาศัยการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันและกัน ดังนั้นในระยะนี้จะทำการสุ่มคำตอบ j ในหมู่นักเรียนทั้งหมดขึ้นมาและนำมาแลกเปลี่ยนข้อมูลกับคำตอบ i (คำตอบปัจจุบัน) โดยคำตอบใหม่สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$X_{new,i} = X_i + r(X_i - X_j) \text{ if } f(X_i) < f(X_j) \quad (2)$$

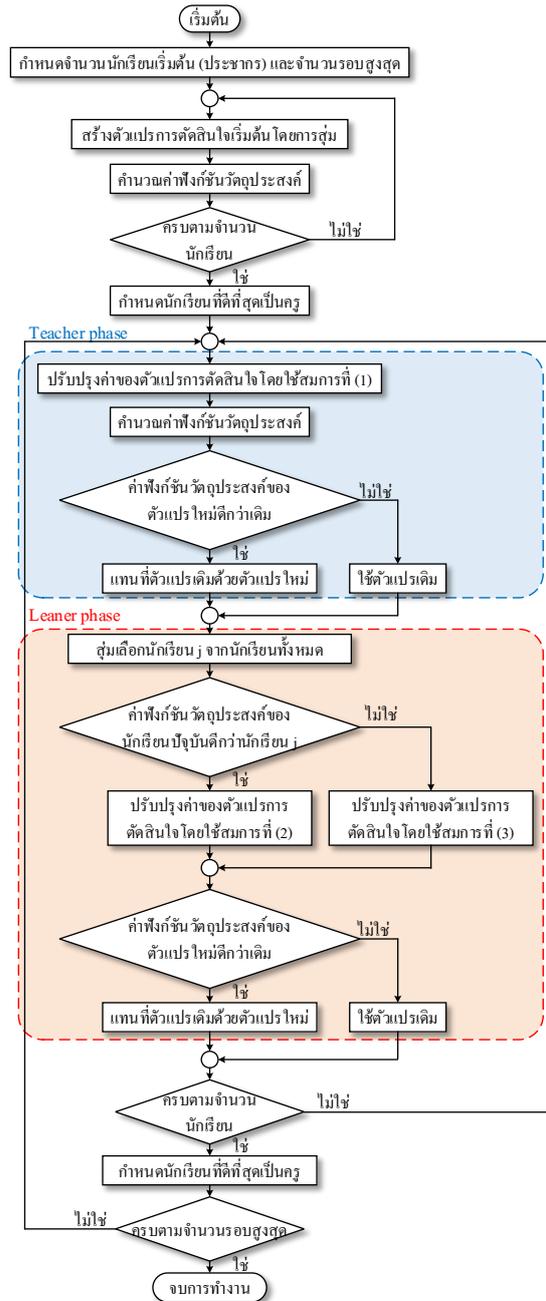
$$X_{new,i} = X_i + r(X_j - X_i) \text{ if } f(X_i) > f(X_j) \quad (3)$$

โดยที่ $X_{new,i}$ และ X_i คือ คำตอบใหม่และคำตอบปัจจุบันของนักเรียน i ตามลำดับ X_j คือ คำตอบที่เลือกจากการสุ่มในหมู่นักเรียน และ $f(X_i)$ และ $f(X_j)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบปัจจุบัน i และคำตอบที่เลือกจากการสุ่ม j ตามลำดับ ซึ่งเช่นเดียวกับระยะการสอน หากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(X_{new,i})$ น้อยกว่า $f(X_i)$ ให้แทนที่คำตอบ X_i ด้วย $X_{new,i}$

สำหรับแผนผัง (Flowchart) ของขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนการสอนแสดงดังรูปที่ 2

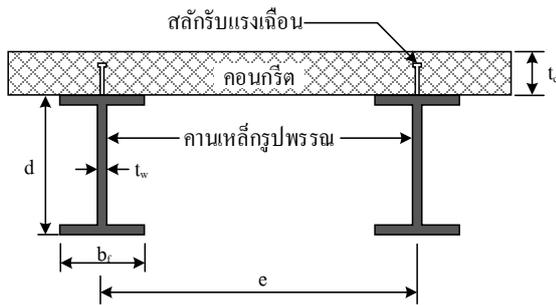
3. การออกแบบโครงสร้างพื้นคอมโพสิต

พื้นคอมโพสิตที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นพื้นคอนกรีตและส่วนที่เป็นคานเหล็กรูปพรรณ (หน้าตัดรูปตัวไอ) โดยทั้งสองส่วนนี้ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยสลักกรับแรงเฉือน (Shear studs) ที่ยึดติดกับเหล็กรูปพรรณ โดยการเชื่อม เพื่อที่จะให้พื้นคอมโพสิตนี้มีพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite behaviors) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แผนผังของขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนการสอน

เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำต่อโครงสร้างพื้นคอมโพสิต จะทำให้เกิดแรงภายในขึ้นภายในโครงสร้าง และยังทำให้โครงสร้างเกิดการโก่งตัว ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในขณะที่กำลังก่อสร้างและใช้งานจึงต้องทำการออกแบบให้โครงสร้างสามารถต้านทานแรงภายในเหล่านี้และมีการโก่งตัวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้มาตรฐานการออกแบบที่กำหนดโดย AISC วิธี LRFD [11] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 ระบบพื้นคอมโพสิต

3.1. กำลังรับโมเมนต์ดัดครีของพื้นคอมโพสิต

การคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัดครีของพื้นคอมโพสิต มี 2 กรณีที่จะต้องพิจารณา คือ กรณีแรก ขณะที่กำลังก่อสร้าง คอนกรีตยังไม่แข็งตัว ทำให้โครงสร้างยังไม่มีพฤติกรรมเชิงประกอบ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาเฉพาะกำลังรับโมเมนต์ดัดครีของคานเหล็กรูปพรรณที่เกิดจากน้ำหนักขณะก่อสร้าง โดย AISC ได้กำหนดให้กำลังรับโมเมนต์ดัดครีของคานเป็นไปตามสมการที่ (4)

$$M_{u\text{-noncomposite}} \leq \phi M_{n\text{-noncomposite}} \quad (4)$$

โดยที่ $M_{u\text{-noncomposite}}$ และ $M_{n\text{-noncomposite}}$ คือ โมเมนต์ดัดครีและกำลังรับโมเมนต์ดัดครีของคานเหล็ก เนื่องจากน้ำหนักขณะก่อสร้าง และ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9

สำหรับกรณีที่ 2 เมื่อคอนกรีตแข็งตัว ทำให้โครงสร้างมีพฤติกรรมเชิงประกอบ ดังนั้นในกรณีนี้จะพิจารณากำลังรับโมเมนต์ดัดครีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน

และน้ำหนักบรรทุกจร โดย AISC ได้กำหนดให้กำลังรับโมเมนต์ดัดครีของพื้นคอมโพสิตเป็นไปตามสมการที่ (5)

$$M_{u\text{-composite}} \leq \phi M_{n\text{-composite}} \quad (5)$$

โดยที่ $M_{u\text{-composite}}$ และ $M_{n\text{-composite}}$ คือ โมเมนต์ดัดครีและกำลังรับโมเมนต์ดัดครีของพื้นคอมโพสิต เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งานและน้ำหนักบรรทุกจร ส่วน ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.85

สำหรับการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดครีของงานวิจัยนี้ กำหนดให้ใช้วิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก (Plastic stress distribution method) โดยจะสมมติให้หน่วยแรงในคอนกรีตเท่ากับ $0.85f'_c$ กระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รับแรงอัดประสิทธิผล และกำหนดให้หน่วยแรงในเหล็กมีค่าเท่ากับหน่วยแรงครากที่กระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รับแรงดึงและแรงอัด [12]

3.2. กำลังรับแรงเฉือนของพื้นคอมโพสิต

การคำนวณกำลังรับแรงเฉือนระบุของพื้นคอมโพสิต จะพิจารณาให้เฉพาะเหล็กรูปพรรณรับแรงเฉือน โดย AISC ได้กำหนดกำลังรับแรงเฉือนระบุให้เป็นไปตามสมการที่ (6)

$$V_u \leq \phi V_n \quad (6)$$

โดยที่ V_u คือ แรงเฉือนประลัย ϕ คือ ตัวคูณลดกำลัง และ V_n คือ กำลังรับแรงเฉือนระบุของเหล็ก มีค่าเท่ากับ $0.60F_yA_wC_v$ โดยที่ F_y คือ กำลังครากของเหล็ก A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของเอว และ C_v คือ สัมประสิทธิ์การเฉือนของเอว ซึ่งเอวของเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่มี $h/t_w \leq 2.24\sqrt{E/F_y}$ ค่า C_v และ ϕ มีค่าเท่ากับ 1.0

3.3. กำลังรับแรงเฉือนของสลักรับแรงเฉือน

โดย AISC กำหนดการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนระบุของสลักรับแรงเฉือนไว้ดังสมการที่ (7)

$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f'_cE_c} \leq R_gR_pA_{sc}F_u \quad (7)$$

เมื่อ Q_n คือ กำลังรับแรงเฉือนระบุของสลัก A_{sc} คือ พื้นที่หน้าตัดของสลัก f'_c คือกำลังอัดของคอนกรีต E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต F_u คือ แรงดึงต่ำสุดของสลักรับแรงเฉือน และ R_g และ R_p มีค่าเท่ากับ 1.0

สำหรับระยะห่างขั้นต่ำและระยะห่างสูงสุดของสลักรับแรงเฉือนที่กำหนดโดย AISC มีดังต่อไปนี้ คือ ระยะเรียงของสลักตามแนวยาวมีค่าอย่างน้อย 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลัก และมีค่าไม่เกิน 8 เท่าของความหนาพื้น

3.4. การโค้งตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

การโค้งตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (8)

$$\Delta = \frac{5W_{LL}L^4}{384E_sI_{tr}} \leq \frac{L}{360} \quad (8)$$

โดยที่ Δ คือค่าการโค้งตัวสูงสุด W_{LL} คือ น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานต่อหน่วยความยาว L คือ ความยาวคาน E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก และ I_{tr} คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลง

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

4.1. ขอบเขตของงานวิจัย

เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5],[12] ขอบเขตของตัวแปรการออกแบบพื้นคอมโพสิตในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของพื้นคอนกรีต หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ และสลักรับแรงเฉือน โดยในส่วนของพื้นคอนกรีต กำหนดให้ใช้กำลังอัดของคอนกรีต (f'_c) เท่ากับ 200 ถึง 400 กก./ตร.ซม. และความหนาของพื้น (t_c) เท่ากับ 80 ถึง 200 มม. สำหรับหน้าตัดคาน กำหนดให้ใช้เหล็กรูปพรรณรูปตัวไอมาตรฐานยุโรปจำนวน 29 หน้าตัด และเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองนี้ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับหน้าตัดเหล็กเช่น พื้นที่หน้าตัด (A_s) ความลึก (d) ความหนาของเอว (t_w) ความหนาของปีก (t_f) และอื่นๆ จะถูกรวมเป็นตัวแปรเดียวซึ่งเรียกว่าหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ โดยกำหนดให้ใช้หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ INP120 ถึง IPB300 ตามมาตรฐาน

European [13] ซึ่งมีระยะห่างระหว่างกัน (e) เท่ากับ 500 ถึง 4000 มม. และสำหรับขนาดและจำนวนของสลักรับแรงเฉือนกำหนดให้เท่ากับ 13 ถึง 22 มม. และ 10 ถึง 50 ตัวตามลำดับ

4.2. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบพื้นคอมโพสิตที่เหมาะสมที่สุดคือ ผลรวมของราคาที่น้อยที่สุด ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (9)

$$C_t = C_c + C_s + C_{sd} \quad (9)$$

โดยที่ C_t คือ ผลรวมของราคา และ C_c , C_s , C_{sd} คือ ราคาของคอนกรีต ราคาของเหล็กรูปพรรณ และราคาของสลักรับแรงเฉือน ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (10)–(12) ดังต่อไปนี้

$$C_c = LWt_c C'_c \quad (10)$$

โดยที่ L คือความยาวของคานเหล็ก W คือความกว้างของพื้น t_c คือความหนาของพื้นคอนกรีต และ C'_c คือราคาของคอนกรีตต่อหน่วย

$$C_s = \left(\frac{W}{e} + 1\right) W_s L C'_s \quad (11)$$

โดยที่ e คือระยะห่างระหว่างคานเหล็ก W_s คือน้ำหนักต่อหน่วยความยาวของคานเหล็ก C'_s คือราคาของคานเหล็กต่อหน่วยน้ำหนัก

$$C_{sd} = N_s \left(\frac{W}{e} + 1\right) C'_{sd} \quad (12)$$

โดยที่ N_s คือจำนวนของสลักเหล็กรับแรงเฉือน C'_{sd} คือราคาวัสดุและการติดตั้งสลักเหล็กรับแรงเฉือน 1 ตัว

สำหรับราคาของวัสดุและค่าแรงในการดำเนินการอ้างอิงมาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5] เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความประหยัดจากการออกแบบได้

ตารางที่ 1 ขอบเขตของตัวแปรการออกแบบพื้นคอมโพสิต

รายการ	ตัวแปรการตัดสินใจ	รายละเอียด
กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	X_1	200, 250, 300, 350, 400
ความหนาของพื้นคอนกรีต (มม.)	X_2	80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200
หน้าตัดเหล็ก รูปพรรณ	X_3	INP120, INP140, INP160, INP180, INP200, INP220, INP240, INP260, INP280, INP300, IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240, IPE270, IPE300, IPB120, IPB140, IPB160, IPB180, IPB200, IPB220, IPB240, IPB260, IPB280, IPB300
ระยะห่างระหว่างคานเหล็ก (มม.)	X_4	500, 800, 1000, 1600, 2000, 4000
ขนาดของสลักรับแรงเฉือน (มม.)	X_5	13, 16, 19, 22
จำนวนสลักรับแรงเฉือน (ตัว)	X_6	10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50

โดยราคาของคอนกรีตต่อหน่วย C'_c เท่ากับ 50 ดอลลาร์/ลบ.ม. ราคาของคานเหล็กต่อหน่วยน้ำหนัก C'_s เท่ากับ 1 ดอลลาร์/กก. และราคาวัสดุและการติดตั้งสลักเหล็กรับแรงเฉือนหนึ่งตัว C'_{sd} เท่ากับ 0.5 ดอลลาร์/ตัว

เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการออกแบบของขั้นตอนวิธี TLBO กับขั้นตอนวิธีอื่นๆ จึงจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์หรือเงื่อนไขการออกแบบเช่นเดียวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แต่เมื่อมีการนำไปใช้งานจริง ผู้ใช้สามารถกำหนดเงื่อนไขการออกแบบ เช่น ขนาดหน้าตัด วัสดุที่ใช้ ราคาวัสดุและค่าแรงและอื่นๆ ได้ตามความเหมาะสมของแต่ละท้องถิ่นนั้นๆ

4.3. การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี

ในการหาค่าที่เหมาะสม ตัวแปรการออกแบบจะเปรียบเสมือนวิชาต่างๆ ที่สอนให้กับนักเรียน และฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเปรียบเสมือนผลลัพธ์ของนักเรียน โดยขั้นตอนการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมตามการเรียนการสอนในการออกแบบโครงสร้างพื้นคอมโพสิตแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของขั้นตอนวิธี ซึ่งประกอบด้วยจำนวนนักเรียนและจำนวนรอบการวนซ้ำสูงสุด

2) ทำการสุ่มตัวแปรการออกแบบเริ่มต้น ซึ่งในขั้นตอนนี้นำกำลังอัดของคอนกรีต ความหนาของพื้น หน้าตัดและระยะห่างของเหล็กรูปพรรณ และขนาดและจำนวนของสลักรับแรงเฉือน จะถูกเลือกโดยการสุ่มจากตารางที่ 1

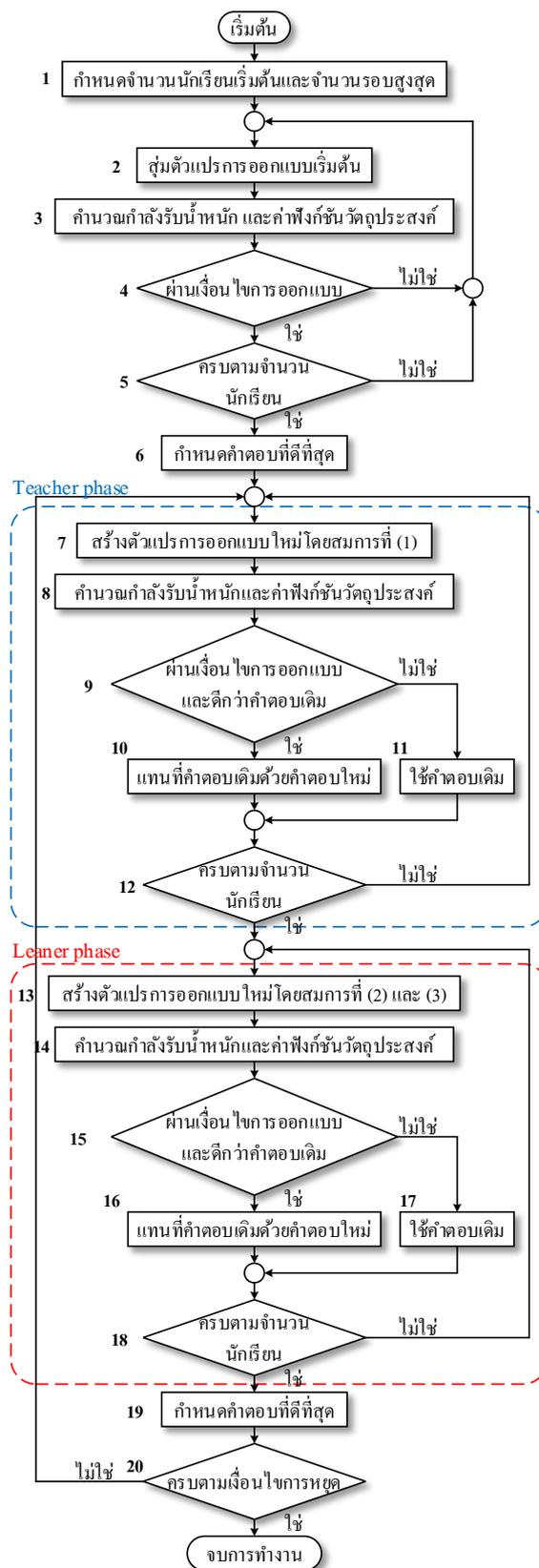
3) คำนวณกำลังรับน้ำหนัก ซึ่งประกอบด้วย กำลังในการต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกและค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นของโครงสร้างตามมาตรฐาน AISC และคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งคือราคารวมของโครงสร้าง

4) ตรวจสอบว่าผ่านเงื่อนไขการออกแบบหรือไม่ หากหน้าตัดสามารถต้านทาน โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นและค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นไม่เกินค่าการโก่งตัวที่ยอมให้ หน้าตัดนี้จะถูกพิจารณาว่าผ่านเงื่อนไขการออกแบบ มิฉะนั้นหน้าตัดนี้จะถูกละทิ้งและให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง

5) ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้รับนั้นครบตามจำนวนนักเรียนที่กำหนดไว้หรือไม่ หากครบให้ไปขั้นตอนที่ 6 มิฉะนั้นให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง

6) กำหนดให้คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในหมู่นักเรียนทั้งหมดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (เป็นครู)

- 7) สร้างตัวแปรการออกแบบใหม่โดยสมการที่ (1)
- 8) คำนวณกำลังรับน้ำหนักและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโครงสร้าง
- 9) ตรวจสอบว่าผ่านเงื่อนไขการออกแบบและมีค่าที่ดีกว่าคำตอบเดิมหรือไม่ หากเป็นไปตามเงื่อนไขนี้ให้ไปยังขั้นตอนที่ 10 มิฉะนั้นให้ไปยังขั้นตอนที่ 11
- 10) หากคำตอบที่ได้ผ่านเงื่อนไขการออกแบบและมีค่าที่ดีกว่าคำตอบเดิม (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบเดิม) จะทำการแทนที่คำตอบเดิมด้วยคำตอบใหม่
- 11) หากคำตอบที่ได้ไม่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบหรือมีค่าไม่ดีกว่าคำตอบเดิม ขั้นตอนวิธีจะคงคำตอบเดิมไว้
- 12) ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้รับนั้นครบตามจำนวนนักเรียนที่กำหนดไว้หรือไม่ หากครบให้ไปยังขั้นตอนที่ 13 มิฉะนั้นให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 7 อีกครั้ง
- 13) สร้างตัวแปรการออกแบบใหม่โดยสมการที่ (2) และ (3)
- 14) คำนวณกำลังรับน้ำหนักและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโครงสร้าง
- 15) ตรวจสอบว่าผ่านเงื่อนไขการออกแบบและมีค่าที่ดีกว่าคำตอบเดิมหรือไม่ หากเป็นไปตามเงื่อนไขนี้ให้ไปยังขั้นตอนที่ 16 มิฉะนั้นให้ไปยังขั้นตอนที่ 17
- 16) หากคำตอบที่ได้ผ่านเงื่อนไขการออกแบบและมีค่าที่ดีกว่าคำตอบเดิม จะทำการแทนที่คำตอบเดิมด้วยคำตอบใหม่
- 17) หากคำตอบที่ได้ไม่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบหรือมีค่าไม่ดีกว่าคำตอบเดิม ขั้นตอนวิธีจะคงคำตอบเดิมไว้
- 18) ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้รับนั้นครบตามจำนวนนักเรียนที่กำหนดไว้หรือไม่ หากครบให้ไปยังขั้นตอนที่ 19 มิฉะนั้นให้กลับไปยังขั้นตอนที่ 13 อีกครั้ง
- 19) กำหนดให้คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในหมู่นักเรียนทั้งหมดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (เป็นครู)
- 20) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดของขั้นตอนวิธี กล่าวคือ หากจำนวนการวนซ้ำในรอบการวนซ้ำปัจจุบันเท่ากับจำนวนการวนซ้ำสูงสุดที่กำหนดไว้ ขั้นตอนวิธีนี้จะหยุดทำงาน มิฉะนั้นจะกลับไปยังขั้นตอนที่ 7 อีกครั้ง



รูปที่ 4 แผนผังการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี TLBO สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของโครงสร้างพื้นคอมโพสิต

5. ตัวอย่างและผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวอย่างการออกแบบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวอย่าง [5],[12] ซึ่งประกอบด้วย พื้นคอมโพสิตขนาด 8×6 ม. ที่มีการใช้ค้ำยันชั่วคราวขณะก่อสร้าง และพื้นคอมโพสิตขนาด 8×6 ม. และขนาด 10×8.5 ม. ที่ขณะก่อสร้างปราศจากค้ำยันชั่วคราว และกำหนดให้ใช้ตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ (13)

$$U = 1.2DL + 1.6LL \quad (13)$$

โดยที่ U คือ น้ำหนักบรรทุกที่คูณค่าตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก DL คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่ LL คือ น้ำหนักบรรทุกจร

ซึ่งแบบจำลองการออกแบบพื้นคอมโพสิตที่เหมาะสมนี้ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้ภาษา Visual basic บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10 หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel(R) Core(TM) i3-7100 3.90 GHz และหน่วยความจำแรม (RAM) 8.00 GB และเพื่อที่จะแสดงผลการทดสอบทางสถิติ (ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ย) จะทำการทดสอบกับตัวอย่างการออกแบบตัวอย่างละ 30 ครั้ง และกำหนดจำนวนรอบการวนซ้ำสูงสุดเท่ากับ 100 รอบ และจะนำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการออกแบบของ Kaveh และ Abadi [5] ที่ทำการออกแบบพื้นคอมโพสิตโดยใช้ขั้นตอนวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (Harmony search algorithm: HS) และขั้นตอนวิธีฮาร์โมนีเสิร์ชที่ได้รับการปรับปรุง (Improved harmony search algorithm: IHS) ซึ่งขั้นตอนวิธีเหล่านี้เลียนแบบกระบวนการในการค้นหาความกลมกลืนของเสียงของนักดนตรี และผลการออกแบบของ Thepchatri และ Lenwari [12]

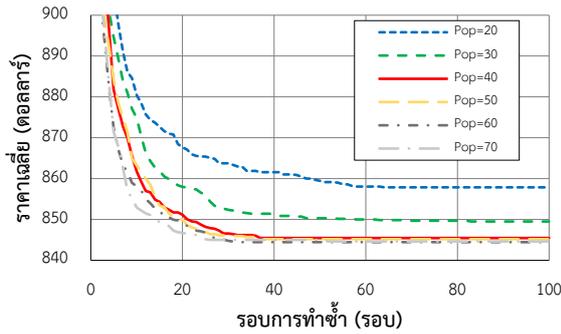
5.1. ตัวอย่างที่ 1

พื้นคอมโพสิตมีความกว้าง 8 ม. และยาว 6 ม. ที่ขณะทำการก่อสร้างมีการใช้ค้ำยันชั่วคราว ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมและน้ำหนักบรรทุกจรกระทำเท่ากับ 305.91 และ 203.94 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และมีหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ (f_y) เท่ากับ 2450 กก./ตร.ซม. โดยตัวแปรการออกแบบที่เป็นไปได้แสดงดังตารางที่ 1

เพื่อทำการวิเคราะห์จำนวนนักเรียนที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี TLBO ได้ทำการทดสอบในตัวอย่างนี้โดยใช้จำนวนนักเรียน 20 30 40 50 60 และ 70 คน โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงผลทางสถิติสำหรับการทดสอบ 30 ครั้ง จากผลการทดสอบนี้พบว่า ในทุกจำนวนนักเรียนขั้นตอนวิธีนี้ค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดได้เท่ากัน สำหรับค่าที่แย่ที่สุด ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีแนวโน้มแปรผกผันตามจำนวนนักเรียน กล่าวคือค่าทางสถิติเหล่านี้มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อจำนวนนักเรียนเพิ่มขึ้น โดยลักษณะการลู่เข้าของขั้นตอนวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยของการทดสอบ 30 ครั้งโดยพบว่าเมื่อจำนวนนักเรียนเพิ่มขึ้น ขั้นตอนวิธีสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่ดีขึ้น และอัตราการลู่เข้าก็เร็วขึ้นด้วย โดยเมื่อจำนวนนักเรียนเท่ากับ 20 30 40 50 60 และ 70 คน ค่าตอบเฉลี่ยที่ค้นพบแตกต่างจากคำตอบที่ดีที่สุดร้อยละ 1.65 0.66 0.18 0.15 0.06 และ 0.08 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากลักษณะการลู่เข้านี้พบว่าการใช้จำนวนนักเรียนเท่ากับ 40 คน นั้นเพียงพอสำหรับการออกแบบพื้นคอมโพสิตที่เหมาะสม และใช้จำนวนการวนซ้ำประมาณ 40 รอบ ในการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยเฉลี่ย ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมและเพียงพอในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดใช้จำนวนนักเรียนเท่ากับ 40 คน และจำนวนการวนซ้ำสูงสุดเท่ากับ 100 รอบ ในทุกตัวอย่างการทดสอบ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบทางสถิติสำหรับจำนวนนักเรียนต่างๆ ในตัวอย่างที่ 1

จำนวนนักเรียน	ค่าที่ดีที่สุด	ค่าที่แย่ที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
20	843.96	916.80	857.87	19.59
30	843.96	879.78	849.51	8.87
40	843.96	853.96	845.46	3.39
50	843.96	855.78	845.19	3.60
60	843.96	853.96	844.46	1.00
70	843.96	853.96	844.63	2.20



รูปที่ 5 ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยของตัวอย่างที่ 1 สำหรับการทดสอบ 30 ครั้ง

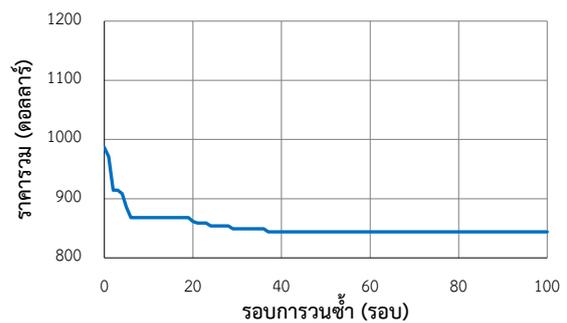
สำหรับผลการออกแบบที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งขั้นตอนวิธี TLBO สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 843.96 ดอลลาร์ ซึ่งน้อยกว่าขั้นตอนวิธี HS [5] และ IHS [5] ร้อยละ 4.42 และ 6.02 ตามลำดับ และขั้นตอนวิธี TLBO ให้คำตอบเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 845.46 และ 3.39 ดอลลาร์ ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้รับแตกต่างจากค่าที่ดีที่สุดเพียงเล็กน้อย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยนี้ แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของขั้นตอนวิธีในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม และนอกจากนี้ ขั้นตอนวิธี TLBO ยังมีจำนวนการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยกว่า ซึ่งเท่ากับ 8000 ครั้ง ในขณะที่ขั้นตอนวิธี HS และ IHS มีจำนวนการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากันซึ่งเท่ากับ 15000 ครั้ง สิ่งนี้เป็นเพราะในระหว่างการสอน ขั้นตอนวิธี TLBO พยายามปรับปรุงค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบทั้งหมด (นักเรียน) ให้เข้าใกล้ค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบที่ดีที่สุด (ครู) นอกจากนี้ในระหว่างการเรียนรู้ ขั้นตอนวิธี TLBO ยังพยายามปรับปรุงค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบทั้งหมดอีกครั้ง โดยการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน ดังนั้นขั้นตอนวิธี TLBO จึงลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมกว่า และรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับสองขั้นตอนวิธีนี้ สำหรับลักษณะการลู่เข้าสู่ของขั้นตอนวิธี TLBO แสดงดังรูปที่ 6 โดยขั้นตอนวิธี TLBO สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว โดยเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 1

รายการ/ขั้นตอนวิธี	HS	IHS	TLBO
กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	350	300	350
ความหนาพื้น (ซม.)	11	11	10
ระยะห่างเหล็ก (ซม.)	200	200	200
หน้าตัดเหล็ก	IPE180	IPE180	IPE180
ขนาดสลัก (มม.)	19	22	19
จำนวนสลัก (ตัว)	22	28	16
ราคารวม (ดอลลาร์)	882.99	897.99	843.96
ร้อยละความแตกต่างเมื่อเทียบกับ TLBO	+4.42	+6.02	0.00
ราคาเฉลี่ย (ดอลลาร์)	-	-	845.46
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ดอลลาร์)	-	-	3.39

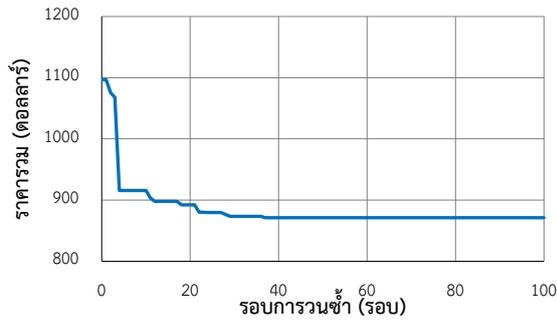
5.2. ตัวอย่างที่ 2

พื้นคอมโพสิต มีความกว้าง ความยาว น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม น้ำหนักบรรทุกจร หน่วยแรงคราก เหมือนกับตัวอย่างที่ 1 แต่ในตัวอย่างนี้ พื้นคอมโพสิตถูกสร้างโดยปราศจากค้ำยันชั่วคราว ซึ่งตัวแปรการออกแบบที่เป็นไปได้แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 6 ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1

สำหรับลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี TLBO แสดงดังรูปที่ 7 โดยขั้นตอนวิธีนี้สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว โดยเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 37



รูปที่ 7 ลักษณะการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 2

ผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างนี้แสดงดังตารางที่ 4 โดยคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้รับจากขั้นตอนวิธี HS [5] และ IHS [5] มีค่ามากกว่าคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้รับจากขั้นตอนวิธี TLBO ที่มีค่าเท่ากับ 871.20 ดอลลาร์ ร้อยละ 2.62 และ 0.61 ตามลำดับ โดยขั้นตอนวิธี TLBO ให้คำตอบเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 916.78 และ 72.03 ดอลลาร์ ตามลำดับ และเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1 ขั้นตอนวิธีนี้มีจำนวนการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 8000 ครั้ง ในขณะที่ขั้นตอนวิธี HS และ IHS มี 15000 ครั้ง และเช่นเดียวกับตัวอย่างก่อนหน้า สิ่งนี้เนื่องมาจากขั้นตอนวิธี TLBO พยายามปรับปรุงค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบทั้งหมด (นักเรียน) ให้เข้าใกล้ค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบที่ดีที่สุด (ครู) ในระหว่างการสอน และพยายามปรับปรุงค่าของตัวแปรการออกแบบของคำตอบทั้งหมดอีกครั้ง โดยการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน ดังนั้นขั้นตอนวิธี TLBO จึงมีประสิทธิภาพสูงในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมและมีความรวดเร็วอย่างมากในการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธี HS และ HIS

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 2

รายการ/ขั้นตอนวิธี	HS	IHS	TLBO
กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	250	350	300
ความหนาพื้น (ซม.)	8	8	8
ระยะห่างเหล็ก (ซม.)	400	400	400
หน้าตัดเหล็ก	INP240	INP240	IPE270

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 2 (ต่อ)

รายการ/ขั้นตอนวิธี	HS	IHS	TLBO
ขนาดสลัก (มม.)	19	22	19
จำนวนสลัก (ตัว)	34	22	20
ราคารวม (ดอลลาร์)	894.60	876.60	871.20
ร้อยละความแตกต่างเมื่อเทียบกับ TLBO	+2.62	+0.61	0.00
ราคาเฉลี่ย (ดอลลาร์)	-	-	916.78
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ดอลลาร์)	-	-	72.03

5.3. ตัวอย่างที่ 3

พื้นคอมโพสิตมีความกว้าง 10 ม. และยาว 8.5 ม. ถูกสร้างโดยปราศจากค้ำยันชั่วคราว ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกขณะก่อสร้างและน้ำหนักบรรทุกใช้งานกระทำเท่ากับ 200 และ 1000 กก./ตร.ม. ตามลำดับ โดยมีหน่วยแรงคราก (f_y) เท่ากับ 2450 กก./ตร.ซม. โดยตัวแปรการออกแบบที่เป็นไปได้แสดงดังตารางที่ 1 แต่ในตัวอย่างนี้จะใช้หน้าตัดเหล็กปีกกว้าง (Wide flange) จำนวน 283 หน้าตัด จากตารางเหล็กมาตรฐานที่กำหนดโดย AISC เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เปรียบเทียบ [12]

สำหรับผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างนี้แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าขั้นตอนวิธี TLBO สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 2795.5 ดอลลาร์ ซึ่งประหยัดกว่าผลการออกแบบของ Thepchattri และ Lenwari [12] ที่นำมาเปรียบเทียบร้อยละ 14.90 สำหรับค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขั้นตอนวิธีนี้เท่ากับ 2873.61 และ 92.29 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

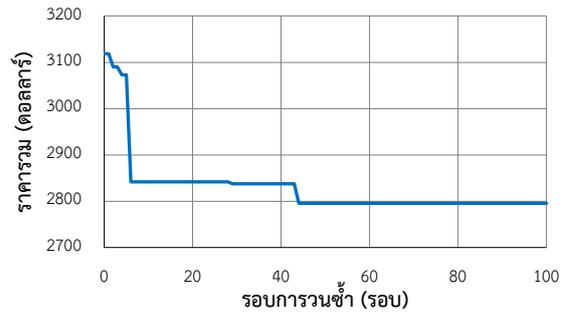
ตารางที่ 5 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 3

รายการ/ขั้นตอนวิธี	Thepchattri และ Lenwari	TLBO
กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	210	300
ความหนาพื้น (ซม.)	10	12

ตารางที่ 5 ผลการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 3 (ต่อ)

รายการ/ขั้นตอนวิธี	Thepchatri และ Lenwari	TLBO
ระยะห่างเหล็ก (ซม.)	250	400
หน้าตัดเหล็ก	W400x66	W530x74
ขนาดสลัก (มม.)	19	19
จำนวนสลัก (ตัว)	22	48
ราคารวม (ดอลลาร์)	3285.0	2795.5
ร้อยละความแตกต่างเมื่อเทียบกับ TLBO	+14.90	0.00
ราคาเฉลี่ย (ดอลลาร์)	-	2873.61
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ดอลลาร์)	-	92.29

ลักษณะการลู่เข้าของขั้นตอนวิธี TLBO แสดงดังรูปที่ 8 โดยเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธี TLBO ลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมอย่างรวดเร็วและมีลักษณะเป็นแบบขั้นบันได โดยเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 44 ซึ่งสิ่งนี้เกิดจากข้อจำกัดด้านการออกแบบ กล่าวคือ เมื่อขั้นตอนวิธี TLBO ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบการทำซ้ำปัจจุบัน ซึ่งในรอบการทำซ้ำถัดไปขั้นตอนวิธี TLBO จะพยายามปรับปรุงคำตอบที่เหมาะสมตามกระบวนการค้นหาคำตอบเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมกว่าคำตอบเดิม แต่หากคำตอบที่ได้ในรอบปัจจุบันเข้าใกล้คำตอบที่เหมาะสมแล้ว จึงเป็นเรื่องอยากที่จะค้นพบคำตอบที่เหมาะสมกว่าในรอบถัดไป และหากค้นพบคำตอบที่เหมาะสมกว่า คำตอบที่ได้อาจไม่ผ่านข้อจำกัดด้านการออกแบบ เช่น ด้านทานโมเมนต์ดัดได้ไม่เพียงพอ หรือมีค่าการโก่งตัวเกินกว่าค่าที่ยอมให้ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนวิธี TLBO จึงปฏิเสธคำตอบที่ค้นพบและคงคำตอบเดิมไว้ ซึ่งส่งผลให้การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีนี้มีลักษณะเป็นแบบขั้นบันไดนั่นเอง



รูปที่ 8 ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของ ตัวอย่างที่ 3

6. สรุป

การออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตนั้นค่อนข้างที่จะซับซ้อนกว่าการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทอื่นๆ ซึ่งค่าของตัวแปรการออกแบบจะมีผลกระทบต่อกันและกัน จึงจำเป็นต้องใช้ขั้นตอนวิธีที่มีศักยภาพที่สูงกว่าขั้นตอนวิธีที่ใช้ทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี TLBO ในการออกแบบระบบพื้นคอมโพสิตที่ประหยัดที่สุดตามมาตรฐาน AISC-LRFD และเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการออกแบบที่เหมาะสมแบบจำลองนี้ถูกทดสอบและเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมกับตัวอย่างการทดสอบจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวอย่าง ซึ่งในตัวอย่างการออกแบบพื้นคอมโพสิตที่มีความกว้าง 8 ม. และยาว 6 ม. ที่ขณะทำการก่อสร้างมีการใช้ค้ำยันชั่วคราวและไม่มีค้ำยันชั่วคราวดังตัวอย่างที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของขั้นตอนวิธี TLBO กับขั้นตอนวิธี HS และ IHS ที่เสนอในวรรณกรรมพบว่าขั้นตอนวิธี TLBO สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่ดีกว่า ใช้จำนวนการประเมินฟังก์ชันที่น้อยกว่า และมีอัตราการลู่เข้าที่รวดเร็ว สำหรับในตัวอย่างที่ 3 เป็นตัวอย่างพื้นคอมโพสิตที่มีความกว้าง 10 ม. และยาว 8.5 ม. ที่ถูกสร้างโดยไม่มีค้ำยันชั่วคราว ขั้นตอนวิธี TLBO ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากหนังสือพฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก โดยงานวิจัยนี้สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่ดีกว่า และมีอัตราการลู่เข้าที่รวดเร็ว ซึ่งจากผลการทดสอบเหล่านี้บ่งชี้ชัดว่า ขั้นตอนวิธี TLBO สามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงสร้างพื้นคอมโพสิตที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Kaveh and M.Ahangaran, "Discrete cost optimization of composite floor system using social harmony search model," *Applied Soft Computing*, vol. 12, no. 1, pp. 372–381, 2012, doi: 10.1016/j.asoc.2011.08.035.
- [2] A. Kaveh and M.S.Massoudi, "Cost optimization of a composite floor system using ant colony system," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 139–148, 2012, doi: 10.22099/IJSTC.2012.631.
- [3] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51–67, 2016, doi: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.
- [4] A. B. Senouci and M. S. Al-Ansari, "Cost optimization of composite beams using genetic algorithms," *Advances in Engineering Software*, vol. 40, no. 11, pp. 1112–1118, 2009, doi: 10.1016/j.advengsoft.2009.06.001.
- [5] A. Kaveh and A. S. M. Abadi, "Cost optimization of a composite floor system using an improved harmony search algorithm," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, no. 5, pp. 664–669, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.01.009.
- [6] R. V. Rao, V. J. Savsani and D. Vakharia, "Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems," *Computer-Aided Design*, vol. 43, no. 3, pp. 303–315, 2011, doi: 10.1016/j.cad.2010.12.015.
- [7] V. Toğan, "Design of planar steel frames using teaching–learning based optimization," *Engineering Structures*, vol. 34, no. 3, pp. 225–232, 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.08.035.
- [8] S. Degertekin and M. Savsani, "Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization," *Computers & Structures*, vol. 119, pp. 177–188, 2013, doi: 10.1016/j.compstruc.2012.12.011.
- [9] H. T. Öztürk, T. Dede and E. Türker, "Optimum design of reinforced concrete counterfort retaining walls using TLBO, Jaya algorithm," *Structures*, vol. 25, pp. 285–296, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.03.020.
- [10] A. Rout, M. Dileep, G. B. Mohanta, B. Deepak and B. Biswal, "Optimal time-jerk trajectory planning of 6 axis welding robot using TLBO method," *Procedia computer science*, vol. 133, pp. 537–544, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.07.067.
- [11] AISC, *LRF Specification for structural steel buildings*, Chicago, IL, USA: American Institute of Steel Construction, 2005, pp. 77–89.
- [12] T. Thepchatri and A. Lenwari, "Composite members," in *Behavior and Design of Steel Structures*, Bangkok: Chulalongkorn, 2010, ch. 9, sec. 3, pp. 387–441.
- [13] Hot rolled I and H sections; dimensions, mass and static parameters, DIN 1025, the German Institute for Standardisation Registered Association, Berlin, Germany, 1995.