

การออกแบบและทดสอบต้นแบบอาคารสำเร็จรูปด้วยเหล็กขึ้นรูปเย็นในประเทศไทย

Design and Testing of Modular Building Prototypes Using Cold-Formed Steel in Thailand

นันทพงษ์ ธีรานนท์^{1,*} วิฑิตวิมล ถิ่นทะเล² และ พันเอก ผศ.ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล³

^{1,2} บริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) จ.กรุงเทพมหานคร

³ กองบัญชาการกองทัพไทย จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: nonthaphongt@gmail.com

บทคัดย่อ

อาคารสำเร็จรูปด้วยโครงสร้างเหล็กกำลังได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่น้ำหนักเบา แข็งแรง และสามารถประกอบได้อย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและทดสอบต้นแบบอาคารสำเร็จรูปโดยใช้เหล็กขึ้นรูปเย็นในบริบทของประเทศไทย โดยศึกษาคุณสมบัติด้านโครงสร้าง ความแข็งแรง และความสามารถในการรับแรงของระบบอาคาร

กระบวนการออกแบบใช้หลักวิศวกรรมโครงสร้างควบคุมกับมาตรฐานสากล เช่น AISI S100 [1] และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องของไทย พร้อมทั้งทำการทดสอบเชิงกลและการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างด้วยซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้าง นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบต้นแบบจริงเพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนัก

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอาคารสำเร็จรูปที่ใช้เหล็กขึ้นรูปเย็นสามารถตอบสนองความต้องการด้านโครงสร้างและความปลอดภัยได้ดี ข้อค้นพบจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาอาคารสำเร็จรูปที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคต และสนับสนุนการเติบโตของอุตสาหกรรมก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปในประเทศไทย

คำสำคัญ: อาคารสำเร็จรูป, เหล็กขึ้นรูปเย็น, การออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็น, AISI S100, การทดสอบต้นแบบอาคารสำเร็จรูป

Abstract

Steel modular buildings have gained significant attention in the construction industry due to their lightweight, high strength, and rapid assembly. This research focuses on the design and prototype testing of modular buildings using cold-formed steel in the context of Thailand. The study examines the structural properties, strength, and load-bearing capacity of the building system.

The design process integrates structural engineering principles with international standards such as AISI S100 and relevant Thai regulations. Additionally, mechanical testing and structural behavior simulations are conducted using analytical

software. Furthermore, physical prototype testing is performed to evaluate load-bearing capacity and overall structural performance.

The findings indicate that steel modular buildings utilizing cold-formed steel effectively meet structural and safety requirements. The insights from this research can be applied to the further development of high-performance modular buildings and support the growth of the modular construction industry in Thailand.

Keywords: Steel modular buildings, Cold-formed steel, Cold-formed steel design, AISI S100, Prototype testing

1. คำนำ

อาคารสำเร็จรูปด้วยโครงสร้างเหล็กกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นในอุตสาหกรรมก่อสร้าง [2] เนื่องจากข้อได้เปรียบที่สำคัญ ได้แก่ น้ำหนักเบา ความแข็งแรง และความสามารถในการประกอบติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วยลดระยะเวลาก่อสร้าง ลดต้นทุนแรงงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการก่อสร้างโดยรวม

1.1 ประเด็นสำคัญของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและทดสอบต้นแบบอาคารสำเร็จรูปที่ใช้เหล็กขึ้นรูปเย็น (Cold-formed Steel) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสูงในอุตสาหกรรมก่อสร้างอาคารสำเร็จรูป [3] เนื่องจากสามารถผลิตเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่มีความแม่นยำสูง น้ำหนักเบา แต่ยังคงความแข็งแรงของโครงสร้างได้ดี

1.2 เป้าหมายของการศึกษา

ศึกษาคุณสมบัติด้านโครงสร้างโดยวิเคราะห์รูปแบบของอาคารสำเร็จรูปที่ใช้เหล็กขึ้นรูปเย็น รวมถึงแนวทางการออกแบบที่เหมาะสมในบริบทของประเทศไทย

ศึกษาความแข็งแรงของระบบโครงสร้าง โดยทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักและพฤติกรรมภายใต้แรงกระทำต่างๆ ตามข้อกำหนดการออกแบบ

ศึกษาประสิทธิภาพในการรับแรงของระบบอาคารสำเร็จรูปโดยประเมินความสามารถการรองรับภาระใช้งานและความปลอดภัยของโครงสร้างอาคาร

1.3 ความสำคัญของการศึกษาในบริบทของประเทศไทย

การศึกษาด้านระบบอาคารสำเร็จรูปในบริบทของประเทศไทยมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากต้องสอดคล้องกับมาตรฐานอาคารและโครงสร้างของประเทศ เพื่อให้มั่นใจว่าอาคารสำเร็จรูปที่ใช้เหล็กขึ้นรูปเย็นสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัยและถูกต้องตามกฎหมาย การออกแบบและทดสอบโครงสร้างจึงต้องเป็นไปตามมาตรฐานวิศวกรรมที่กำหนดไว้ เช่น มาตรฐานการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็น พ.ศ. 2567 [4] ซึ่งเป็นข้อกำหนดหลักด้านโครงสร้างเหล็กเย็น และพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และฉบับแก้ไขเพิ่มเติม [5] ซึ่งกำหนดข้อบังคับเกี่ยวกับความปลอดภัยและการใช้งานของอาคารสำเร็จรูป การศึกษานี้จึงช่วยให้มั่นใจว่าระบบอาคารสำเร็จรูปสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานและนำไปใช้ได้จริงโดยไม่ขัดต่อข้อกำหนด

นอกจากนี้ การเลือกใช้วัสดุที่ผลิตภายในประเทศได้ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดต้นทุนและเพิ่มความคุ้มค่าในการก่อสร้าง วัสดุหลัก เช่น เหล็กแผ่นรีดเย็นที่ใช้ในการผลิตเหล็กขึ้นรูปเย็นที่สามารถหาได้จากผู้ผลิตภายในประเทศ จะช่วยลดผลกระทบจากความผันผวนของราคาวัสดุในตลาดโลก เนื่องจากสามารถพึ่งพาแหล่งวัตถุดิบในประเทศได้มากขึ้น

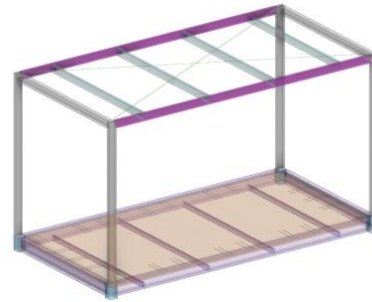
ข้อจำกัดด้านการขนส่งและการติดตั้งเป็นอีกประเด็นที่ต้องพิจารณาในการออกแบบอาคารสำเร็จรูปให้เหมาะสมกับข้อกำหนดทางกฎหมายของไทย ขนาดและน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้างต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของกฎหมายจราจรทางบกและกฎหมายควบคุมน้ำหนักบรรทุก เพื่อให้สามารถขนส่งได้โดยไม่ต้องขออนุญาตพิเศษ การใช้ระบบโมดูลาร์ที่สามารถถอดประกอบได้ช่วยให้สามารถขนส่งเป็นชิ้นส่วนมาตรฐาน ลดความยุ่งยากในการขนส่งผ่านเส้นทางที่มีข้อจำกัด และทำให้การขนย้ายสะดวกขึ้น นอกจากนี้ การออกแบบให้โครงสร้างสามารถประกอบและติดตั้งได้อย่างรวดเร็วในไซต์งาน ยังช่วยลดต้นทุนแรงงานและระยะเวลาการก่อสร้าง โดยไม่กระทบต่อกฎหมายควบคุมอาคารของแต่ละพื้นที่

ดังนั้น การศึกษาระบบอาคารสำเร็จรูปจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย ไม่เพียงแต่ช่วยให้สามารถพัฒนาอาคารที่มีคุณภาพ ปลอดภัย และสอดคล้องกับมาตรฐานเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้วัสดุ ลดต้นทุน และเอื้อต่อการขนส่งและติดตั้งที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกด้วย

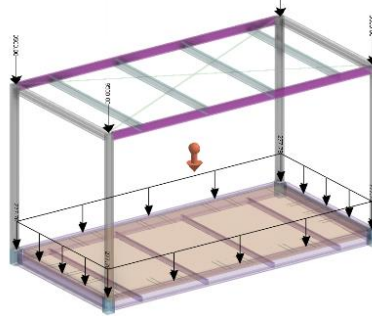
2. ตัวอย่างการวิเคราะห์ต้นแบบอาคารสำเร็จรูปด้วยเหล็กขึ้นรูปเย็น

การวิเคราะห์ต้นแบบอาคารสำเร็จรูปด้วยเหล็กขึ้นรูปเย็นดำเนินการโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ตามรูปที่ 1) โดยข้อกำหนดใน

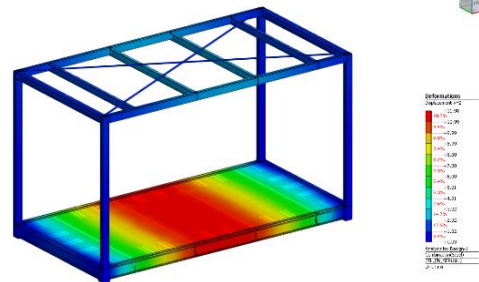
การออกแบบอาคารสำเร็จรูปด้วยเหล็กขึ้นรูปเย็นเป็นไปตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และฉบับแก้ไขเพิ่มเติม



รูปที่ 1 ตัวอย่างแบบจำลองโครงสร้างอาคารสำเร็จรูปด้วยเหล็กขึ้นรูปเย็น



รูปที่ 2 ตัวอย่างแรงกระทำของแบบจำลองโครงสร้างอาคารสำเร็จรูปด้วยเหล็กขึ้นรูปเย็น



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างอาคารสำเร็จรูปด้วยเหล็กขึ้นรูปเย็น

3. การทดสอบการรับน้ำหนักของต้นแบบอาคารสำเร็จรูปด้วยเหล็กขึ้นรูปเย็น

การทดสอบการรับน้ำหนักของอาคารสำเร็จรูป (ตามรูปที่ 4) มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักและความมั่นคงของโครงสร้าง โดยมีการติดตั้ง Strain Gauges (SGs) บนองค์ประกอบโครงสร้างหลัก (ตามรูปที่ 5) ได้แก่ คานเหล็ก Double-C จำนวน 8 ตัว, คานเหล็ก Single-C จำนวน 4 ตัว, เสาเหล็ก 4 ต้น และแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป 5 แผ่น

นอกจากนี้ ยังติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว (Displacement Transducers) (ตามรูปที่ 6) เพื่อตรวจสอบการเสียรูปของคานและพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปการทดสอบอาคารสำเร็จรูปใน 2 กรณี ได้แก่

3.1 การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนัก (Gravity Load-Carrying Capacity) (ตามรูปที่ 7)

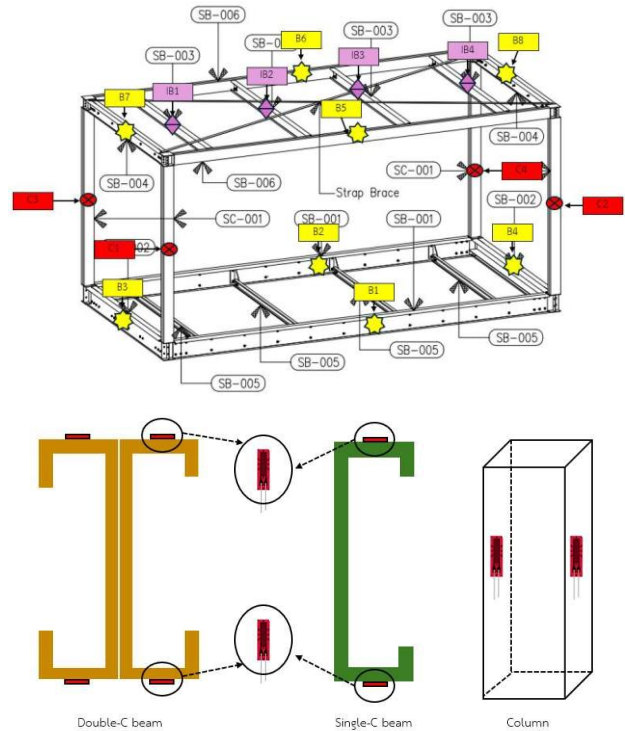
แรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงหรือแรงดัดถูกนำมาใช้ผ่านระบบปัมมือไฮดรอลิกและกระบอกสูบ โดยจุดรับแรงได้รับการออกแบบให้แสดงแรงกระทำแบบกระจายสม่ำเสมอที่ 200 กก./ม² ส่งผลให้เกิดแรงกระทำรวม 3,600 กก. (3.6 ตัน) บนพื้นที่แผ่นพื้นขนาด 18 ม²

กลไกการถ่ายโอนน้ำหนักอาศัยโครงเหล็กหลักและโครงเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีการตรวจวัดค่าแรงกระทำผ่านเซลล์วัดน้ำหนัก (Load Cells - LCs) จำนวนสองตัว ซึ่งผ่านการสอบเทียบ (ตามรูปที่ 5) การทดสอบดำเนินการโดยเพิ่มแรงกระทำจากศูนย์จนถึงค่าที่ออกแบบไว้ที่ 3.6 ตัน และเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 5.0 ตัน ก่อนจะลดลงจนถึงศูนย์

3.2 การทดสอบเสถียรภาพโครงสร้างขณะยกย้าย (Lifting Test) (ตามรูปที่ 9)

หลังจากเสร็จสิ้นการทดสอบการรับน้ำหนัก ได้มีการทดสอบการยกย้ายโดยใช้เครนที่มีความสามารถรับน้ำหนัก 25 ตัน

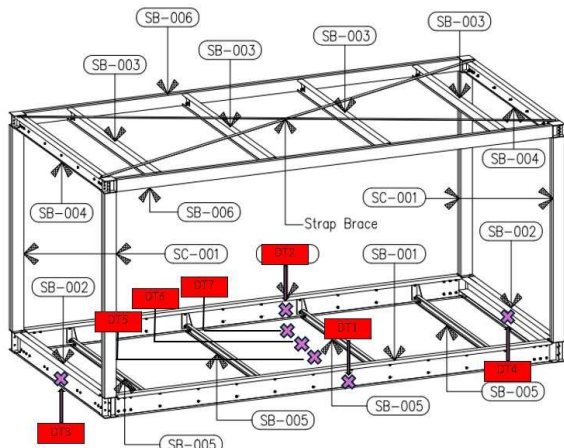
อาคารสำเร็จรูปทั้งหลังถูกยกขึ้น โดยมีการตรวจวัดค่าความเครียดในองค์ประกอบโครงสร้างทั้งหมดอย่างใกล้ชิด เพื่อประเมินกลไกการถ่ายโอนน้ำหนักและเสถียรภาพของโครงสร้าง



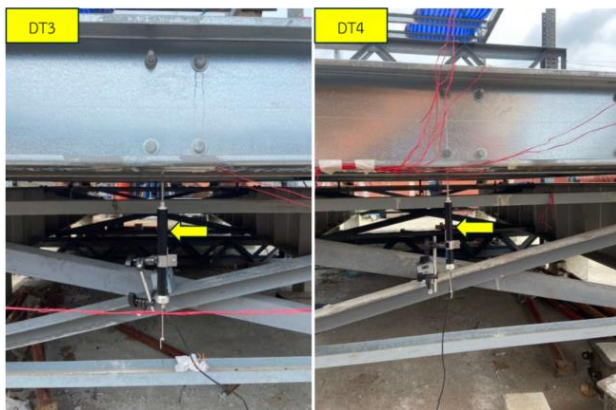
รูปที่ 4 ชุดทดสอบของอาคารสำเร็จรูป



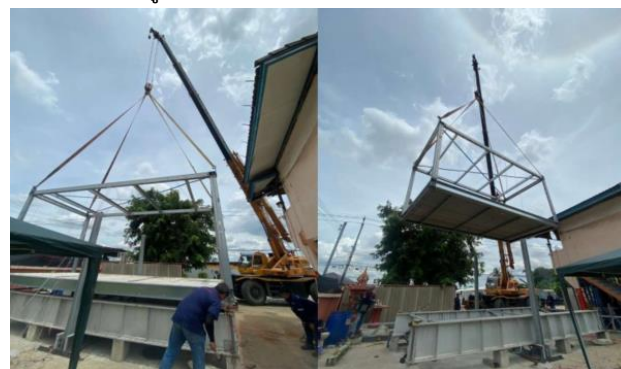
รูปที่ 5 การติดตั้ง Strain Gauges (SGs) บนองค์ประกอบโครงสร้างหลัก



รูปที่ 7 การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนัก (Gravity Load-Carrying)



รูปที่ 8 เซลล์วัดน้ำหนัก (Load Cells - LCs)



รูปที่ 6 การติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว (Displacement Transducers)

รูปที่ 9 การทดสอบเสถียรภาพโครงสร้างขณะยกย้าย (Lifting Test)

4. บทสรุป

4.1 การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนัก (Load Carrying

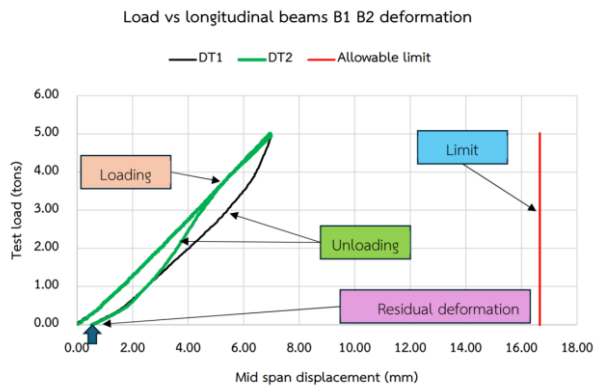
Capacity Test)

โครงสร้างอาคารสำเร็จรูปชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็นและองค์ประกอบ
ต่างๆ สามารถรับแรงได้ตามที่ออกแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การเสียรูปของโครงสร้าง

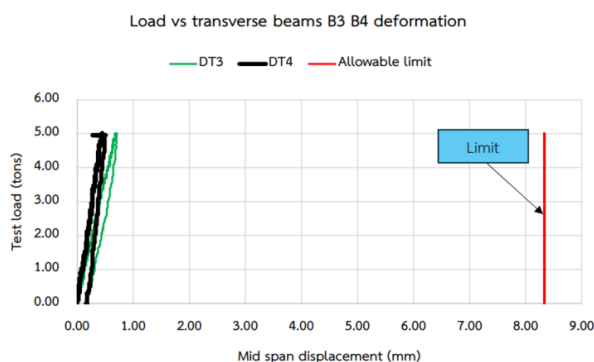
ทุกองค์ประกอบมีพฤติกรรมการเสียรูปแบบเชิงเส้นและคืนตัวได้หลัง
การทดสอบ ค่าการเสียรูปสูงสุดที่วัดได้มีรายละเอียดดังนี้:

คานตามแนวยาว: 6.99 มม. (ตามรูปที่ 10) ต่ำกว่าการวิเคราะห์ด้วย
แบบจำลองที่ 11.72 มม. และต่ำกว่าค่ากำหนดที่ 16.66 มม.



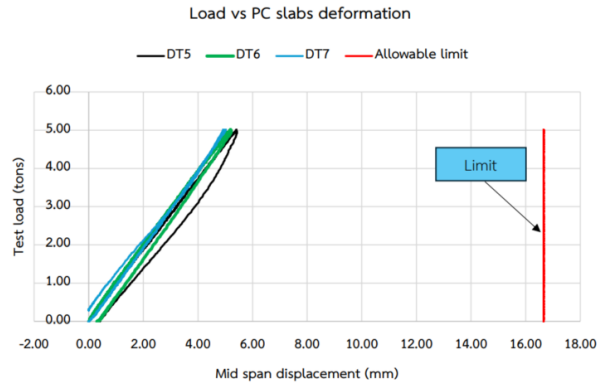
รูปที่ 10 ผลทดสอบการเสียรูปของโครงสร้างของคานตามแนวยาว

คานขวาง: 0.69 มม. (ตามรูปที่ 11) ต่ำกว่าการวิเคราะห์ด้วย
แบบจำลองที่ 1.22 มม. และต่ำกว่าค่ากำหนดที่ 8.33 มม.



รูปที่ 11 ผลทดสอบการเสียรูปของโครงสร้างของคานขวาง

พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป: 5.42 มม. (ตามรูปที่ 12) ต่ำกว่าการวิเคราะห์
ด้วยแบบจำลองที่ 11.73 มม. และต่ำกว่าค่ากำหนดที่ 16.66 มม.



รูปที่ 12 ผลทดสอบการเสียรูปของโครงสร้างของพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป

2.2.2 ค่าความเค้นดึงในองค์ประกอบโครงสร้าง

เหล็กโครงสร้าง: ค่าความเค้นดึงสูงสุดของคานและเสาคือ 248 $\mu\epsilon$ และ
82 $\mu\epsilon$ ตามลำดับ (รายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 2) ค่าที่วัดได้ต่ำ
กว่าค่าจำกัดการยึดตัวของเหล็ก (1200 $\mu\epsilon$) ส่งผลให้ไม่มีการเสียรูปถาวร
หรือการวิบัติของวัสดุ

ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดค่าความเค้นดึงสูงสุดของคาน

Member	Max tensile strain ($\mu\epsilon$)	Min compressive strain ($\mu\epsilon$)	Yielding strain ($\mu\epsilon$)	Evaluation result
B1	248	-130	1200	Passed
B2	245	-183	1200	Passed
B3	85	-32	1200	Passed
B4	103	-36	1200	Passed
B5	51	-33	1200	Passed
B6	54	-50	1200	Passed
B7	42	-17	1200	Passed
B8	47	-23	1200	Passed
IB1	49	-22	1200	Passed
IB2	47	-40	1200	Passed
IB3	40	-31	1200	Passed
IB4	46	-18	1200	Passed

ตารางที่ 2 สรุปรายละเอียดค่าความเค้นดึงสูงสุดของเสา

Member	Max tensile strain ($\mu\epsilon$)	Min compressive strain ($\mu\epsilon$)	Yielding strain ($\mu\epsilon$)	Evaluation result
C1	36	-24	1200	Passed
C2	52	-17	1200	Passed
C3	82	-27	1200	Passed
C4	53	-30	1200	Passed

พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป: ค่าความเค้นดึงสูงสุด: 118 $\mu\epsilon$ โดยมีรายละเอียด
ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 (ต่ำกว่าค่าการแตกร้าวของคอนกรีตที่ 300 $\mu\epsilon$)
ส่งผลให้ไม่มีรอยร้าวในคอนกรีต

ตารางที่ 3 สรุปรายละเอียดค่าความเค้นดึงสูงสุดของพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป

Member	Max tensile strain ($\mu\epsilon$)	Min compressive strain ($\mu\epsilon$)	Cracking strain ($\mu\epsilon$)	Evaluation result
PCS1	104	N.C.	300	Passed
PCS2	118	N.C.	300	Passed
PCS3	110	N.C.	300	Passed
PCS4	93	N.C.	300	Passed
PCS5	99	N.C.	300	Passed

Note: N.C. not to consider for the compressive strain in slabs

4.2 การทดสอบการยก (Lifting Test)

4.2.1 ความมั่นคงของโครงสร้าง

โครงสร้าง จุดเชื่อมต่อ หรืออุปกรณ์ยกไม่มีความเสียหาย

4.2.2 ค่าความเค้นในระหว่างการยก

ค่าเค้นสูงสุดที่วัดได้: เสาค: 136 $\mu\epsilon$, คาน: 152 $\mu\epsilon$, และพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป: 167 $\mu\epsilon$ ค่าความเค้นต่ำกว่าค่าจำกัดของวัสดุ ทำให้โครงสร้างคงสภาพสมบูรณ์ โดยมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 4,5,6

ตารางที่ 4 สรุปรายละเอียดค่าความเค้นดึงสูงสุดของคาน

Member	Max tensile strain ($\mu\epsilon$)	Yielding strain ($\mu\epsilon$)	Evaluation result
B1	36	1200	Passed
B2	152	1200	Passed
B3	131	1200	Passed
B4	93	1200	Passed
B5	100	1200	Passed
B6	106	1200	Passed
B7	28	1200	Passed
B8	70	1200	Passed
IB1	62	1200	Passed
IB2	128	1200	Passed
IB3	77	1200	Passed
IB4	64	1200	Passed

ตารางที่ 5 สรุปรายละเอียดค่าความเค้นดึงสูงสุดของเสา

Member	Max tensile strain ($\mu\epsilon$)	Yielding strain ($\mu\epsilon$)	Evaluation result
C1	72	1200	Passed
C2	89	1200	Passed
C3	136	1200	Passed
C4	118	1200	Passed

ตารางที่ 6 สรุปรายละเอียดค่าความเค้นดึงสูงสุดของพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป

Member	Max tensile strain ($\mu\epsilon$)	Cracking strain ($\mu\epsilon$)	Evaluation result
PCS1	11	300	Passed
PCS2	6	300	Passed
PCS3	7	300	Passed
PCS4	28	300	Passed
PCS5	167	300	Passed

4.3 สรุปผล

จากการทดสอบพบว่าอาคารสำเร็จรูปสามารถรองรับน้ำหนักและแรงยกได้โดยไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น องค์ประกอบโครงสร้างทั้งหมดแสดงพฤติกรรมเชิงเส้นและสามารถคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมได้หลังจากการทดสอบ ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างมีความแข็งแรง มั่นคง และสามารถรับแรงกระทำได้ตามที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ การตรวจสอบหลังการทดสอบไม่พบรอยร้าวหรือความเสียหายในส่วนประกอบของอาคาร แสดงให้เห็นว่าการออกแบบและการก่อสร้างเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ในการนำไปใช้งานจริง อาจมีปัจจัยเพิ่มเติมที่ต้องพิจารณาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เช่น ข้อกำหนดทางสถาปัตยกรรมเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริง ความสวยงาม และวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ข้อกำหนดด้านการผลิตเพื่อให้มั่นใจว่าชิ้นส่วนต่าง ๆ ของอาคารสามารถผลิตได้จริงในกระบวนการผลิตที่มีอยู่ โดยต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด มีความแม่นยำ และสามารถผลิตซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อรองรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์ รวมถึงต้องสามารถประกอบเข้าด้วยกันได้อย่างสมบูรณ์ ข้อกำหนดด้านกระบวนการประกอบและติดตั้งเพื่อให้การก่อสร้างดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ลดความผิดพลาด และเพิ่มความรวดเร็วในการติดตั้ง รวมถึงปัจจัยด้านความปลอดภัยและการบำรุงรักษาเพื่อให้มั่นใจว่าอาคารสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยในระยะยาวและดูแลรักษาได้สะดวก ดังนั้น แม้ว่าผลการทดสอบจะยืนยันถึงความแข็งแรงและความมั่นคงของโครงสร้าง แต่การนำไปใช้งานจริงยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เพื่อให้มั่นใจว่าอาคารสำเร็จรูปสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือจาก คุณฐิติวิธส์ ถิ่นทะเล และการสนับสนุนจาก บริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเปิดโอกาสและจัดสรรทรัพยากรที่จำเป็น ทำให้สามารถพัฒนาผลงานนี้จนบรรลุเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ดร.บันเจตน์ ธรรมรักษ์ ที่เอื้อเฟื้อและดูแลสำหรับสถานที่ใช้ในการทดสอบอาคารสำเร็จรูป รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล ผู้ให้การสนับสนุนทางวิชาการและมอบคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในทุกขั้นตอนของกระบวนการทำงาน นอกจากนี้ ขอขอบคุณ ดร.กิตตินันท์ อีธรรมวิทย์ สำหรับคำปรึกษาและข้อเสนอแนะซึ่งช่วยให้อุณหภูมิของงานเขียนนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ท้ายที่สุด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา ผู้เป็นรากฐานสำคัญของชีวิต ที่มอบโอกาสทางการศึกษา หล่อหลอมแนวคิด และปลูกฝังคุณค่าที่สั่งสมมาโดยตลอด รวมถึง ภรรยาและทุกคนในครอบครัว ที่อยู่เคียงข้าง ให้กำลังใจ และสนับสนุนในทุกช่วงเวลาของชีวิต ความรัก ความเข้าใจ และแรงสนับสนุนจากทุกท่านคือพลังสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถก้าวข้ามอุปสรรคและนำพาผลงานนี้ไปสู่ความสำเร็จอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Iron and Steel Institute (AISI), 25 Massachusetts Avenue, NW, Suite800, Washington, DC 20001
- [2] Shreeja Kacker, Nazrul Islam (2023). Building the future: a literature review on the advancements and innovations in prefabricated modular structures. *Journal of Research Administration* (Vol. 5 No. 2, 2023), pp. 10903-10936.
- [3] Thirunavukkarasu, K., Kanthasamy, E., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K.,Rajanayagam, H., Suntharalingam, T., & Dissanayake, M. (2021). Sustainable Performance of a Modular Building System Made of Built-Up Cold-Formed Steel Beams. *Buildings*, 11, 460. <https://doi.org/10.3390/buildings11100460>.
- [4] วสท.011024-24 มาตรฐานการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็น พ.ศ.2567 EIT-011024-24 Specification of the Design of Cold-Formed Steel Structural Member 2024
- [5] พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และฉบับแก้ไขเพิ่มเติม