

แนวคิดเกี่ยวกับโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม และการศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไฟแบบร่วมสมัย

The conceptual of structure in architecture and the study of structure in contemporary bamboo architecture

**รัชบุพรรณ คำสิงห์ศรี^{1*} , วนดี พินิจวรสิน² , อรศิริ ปาณินท์³
และ ปารเมศ กำแหงฤทธิ์รงค์⁴**

¹นิสิตปริญญาเอก, ²รองศาสตราจารย์, ³ศาสตราจารย์เกียรติคุณ และ ⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

**Rutchanoophan Kumsingsree^{1*} ,Wandee Pinijvarasin ²,
Ornsiri Panin³ and Paramas Kamhangrittirong⁴**

¹Ph.D. Candidate , ²Associate Professor ,³Professor Emerita
and ⁴Assistant Professor, Faculty of Architecture, Kasetsart University,
Bangkok,Thailand,10900

*Email: rutchanoophan.k@msu.ac.th, rutchanoophan.k@ku.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นบทความวิชาการ มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ทำความเข้าใจแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม 2) สังเคราะห์ประเด็นสำคัญจากแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมสู่การศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไฟแบบร่วมสมัย โดยใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม และผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมที่ใช้ไฟเป็นวัสดุก่อสร้าง ผลการศึกษา พบว่า แนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมมีความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กับ (1) รูปทรงโครงสร้าง (2) คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ (3) การรับแรง (4) การกำหนดที่ว่างทางสถาปัตยกรรม ซึ่งประเด็นเหล่านี้นำไปสู่การศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไฟแบบร่วมสมัย โดยมีสาระสำคัญหรือประเด็นที่ต้องพิจารณาดังนี้ (1) รูปทรงโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม (2) คุณสมบัติเชิงกลของไฟที่ใช้ก่อสร้าง (3) ประเภทชิ้นส่วนโครงสร้าง และจุดรองรับแรง (4) รูปแบบการนำไฟมาใช้โครงสร้าง และระยะช่วงพาด (5) ข้อต่อ และการเชื่อมต่อลำไฟ

คำสำคัญ: โครงสร้าง, โครงสร้างทางสถาปัตยกรรม, สถาปัตยกรรมไฟ, สถาปัตยกรรมไฟแบบร่วมสมัย

Abstract

The main purposes of this academic article are to 1) understand the concept of structure in architecture 2) synthesize the key points from the concept of structure in architecture to conceptual framework of contemporary bamboo architecture. By reviewing the concept of structure in architecture literature and case studies of architecture using bamboo as a construction material, the results found that concepts of structure in architecture are related to (1) structural geometries (2) material properties (3) structural loads (4) architectural space. These issues lead to a studying structure in contemporary bamboo architecture; thus, there are essences or factors that considered as follows: (1) shapes of structure in architecture (2) mechanical properties of bamboo (3) structural elements and support types (4) the pattern of using bamboo in structure and span (5) bamboo joint and joinery.

Keywords: structure, structure in architecture, bamboo architecture, contemporary bamboo architecture

Received: August 31, 2022; **Revised:** December 12, 2022; **Accepted:** December 23, 2022

1. บทนำ

จากพัฒนาการทางโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ตามประวัติศาสตร์งานสถาปัตยกรรมมีอายุเริ่มต้น 10,000 ปีมาแล้วเท่านั้น (ชลธิ อัมมอดม, 2554) เดิมทีมนุษย์เร่ร่อนและแสวงหาอาหารไม่เป็นหลักแหล่ง ส่งผลให้เกิดที่อยู่อาศัยแบบกระโจม อันเป็นที่มาของสถาปัตยกรรมชั่วคราวที่สามารถพบได้ในชนเผ่าเร่ร่อน (nomadic architecture) จนกระทั่งมนุษย์ได้ค้นพบการทำเกษตรกรรมซึ่งนำไปสู่การลงหลักปักฐาน ที่พักแบบชั่วคราวจึงได้แปรเปลี่ยนเป็นที่อยู่อาศัยแบบถาวร ดังนั้นการพัฒนาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมจึงเกิดขึ้นเพื่อตอบสนองต่อประโยชน์ใช้สอยในวิถีชีวิตอย่างแท้จริง

ขณะที่การศึกษาของ Witte (2018) ชี้ให้เห็นว่า พบหลักฐานที่ปรากฏการใช้งาน “ไฟ” ในฐานะวัสดุก่อสร้างสถาปัตยกรรมมาอย่างยาวนานในหลายภูมิภาคทั่วโลก เช่น ช่วงเวลา 3,000 ปี ก่อนคริสต์ศักราช พบร่องรอยโครงสร้างกระท่อมในจีน ช่วงหลังคริสต์ศักราช 850 ปี พบร่องรอยอารยธรรมชาว Chimu ในเปรู ซึ่งใช้ไฟในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว (Witte, 2018) นอกจากนี้ที่อยู่อาศัยแล้วนั้น สามารถพบการใช้งานไฟในโครงสร้างสะพานช่วงพาดกว้างด้วยเช่นกัน ในช่วงศตวรรษที่ 13 จากบันทึกของ มาร์โค โปโล พบว่า ในทางโจวประเทศจีน มีสะพานไฟถึง 12,000 สะพาน (Lopez, 2003) หลักฐานเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า ไฟมีบทบาทอย่างยิ่งต่อการใช้เป็นวัสดุที่เกี่ยวข้องกับมิติทางด้านโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ในฐานะพืช ไฟ ไม่มีวิวัฒนาการมาจากพืช

ในตระกูลหญ้า (Gramineae หรือ Poaceae) อย่างไรก็ตามไม้มีข้อแตกต่างจากหญ้า คือ มีกระบวนการสร้างสารลิกนิน(Lignification) ซึ่งเป็นส่วนประกอบในผนังเซลล์พอลิเมอร์ ทำหน้าที่ประสานเส้นใยเซลลูโลส จึงทำให้เนื้อเยื่อไม้แข็งแรงคล้ายกับการมีเนื้อไม้ (woody bamboo) และถือเป็นวัสดุเชิงประกอบ (composite material) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ดังนั้นไผ่จึงมีคุณสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับไม้ แต่มีความยืดหยุ่น และน้ำหนักเบากว่าเนื่องจากหน้าตัดกลวงไม่มีท่อน (Liese, 1985) ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่เหมาะสมกับการใช้งานโครงสร้างและอุตสาหกรรมแปรรูปต่าง ๆ ส่งผลให้ไผ่มีศักยภาพที่ดีในการใช้เป็นวัสดุเพื่อทดแทนการใช้ไม้ (Gupta & Kumar, 2008) โดยเฉพาะในภาวะที่ทั่วโลกประสบกับสถานการณ์การขาดแคลนไม้สำหรับการก่อสร้างที่อยู่อาศัยในช่วงปลาย พ.ศ.2523 (ค.ศ.1980) (Manandhar et al., 2019)

ในฐานะทรัพยากร ไม้ ถือเป็นทรัพยากรที่เกี่ยวข้องกับมิติความยั่งยืน เนื่องจากมีวัฏจักรในการเก็บเกี่ยวสั้น (Disén & Clouston, 2013) มีอัตราการเติบโตที่รวดเร็ว ปลูกเป็นป่าไผ่ที่พร้อมใช้งานได้ในเวลา 3-4 ปี (Song et al., 2011) โดยในปี พ.ศ.2543 (ค.ศ. 2000) Simon Velez สถาปนิกชาวโคลัมเบียได้ใช้ไผ่พันธุ์กัวดัว (Guadua) เป็นวัสดุโครงสร้างอาคาร ZERI pavilion ในงาน World Expo เมือง Hanover ประเทศเยอรมนี บนแนวคิดความยั่งยืนและเทคนิคการก่อสร้างอาคารด้วยไผ่ ซึ่งถือเป็นความเคลื่อนไหวหนึ่งของกระแสการใช้ไผ่ที่สอดคล้องกับหลักความยั่งยืนในสถาปัตยกรรม (ZERI Foundation, 2012) โดยการใช้วัสดุก่อสร้างประเภทไผ่นั้นเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ เนื่องจากในกระบวนการผลิตวัสดุประเภทคอนกรีตและเหล็กมีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ความร้อน และฝุ่น เข้าสู่ชั้นบรรยากาศ อันเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก (Maikol et al., 2020) จากประเด็นดังกล่าว ไผ่จึงถือเป็นวัสดุหมุนเวียน (renewable materials) และวัสดุเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อันตอบสนองนโยบายขององค์การสหประชาชาติ ภายใต้เป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (SDGs) ที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2558 (ค.ศ. 2015) ซึ่งสัมพันธ์กับทิศทางการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับไผ่ โดยในช่วงหลังจากปีดังกล่าว พบว่า การเผยแพร่บทความในระดับนานาชาติ มีประเด็นที่เกี่ยวข้องกับไผ่ในฐานะวัสดุทางเลือก วัสดุยั่งยืน วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมด้วยเช่นกัน (รัชนุพรรณ คำสิงห์ศรี และ วันดี พินิจวรสิน, 2565)

ในฐานะวัสดุก่อสร้าง ไผ่ มีคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการเป็นวัสดุก่อสร้าง ยกตัวอย่างเช่นในการศึกษาของ Gutu (2013) ได้อธิบายว่า ไผ่สามารถรับแรงดึงได้ 14.8-38.4 kN/cm² และรับแรงดัดได้ 7.6-27.6 kN/cm² ในขณะที่เหล็กสามารถรับแรงดึงได้ 16.0 kN/cm² และรับแรงดัดได้ 14.0 kN/cm² (Gutu, 2013) นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายท่าน เช่น Oscar Hidalgo López, Bhavna Sharma, J.J.A. Janssen, Yan Xian, Andry Widyowijatnoko, Kent A. Harries, Edwin Zea Escamilla, Sebastian Kaminski, David Trujillo ฯลฯ ได้ทำการศึกษา และทดลองเชิงวิศวกรรม เพื่อเผยให้เห็นถึงศักยภาพของการรับน้ำหนักของลำไผ่ โดยการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของไผ่ในหลากหลายสายพันธุ์ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ซึ่งความแข็งแรงของไผ่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดพันธุ์ คุณสมบัติเชิงกล คุณลักษณะทางกายภาพ ความหนาแน่นของเส้นใย อายุที่เหมาะสม ฤดูกาลในการตัด การทรีตเมนต์ลำไผ่ เป็นต้น

ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อความแข็งแรงของการนำไม้มาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมด้วยกัน (Kaminski et al., 2016)

แม้ว่าไม้จะมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการเป็นวัสดุโครงสร้าง อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า การศึกษาโครงสร้างในงานสถาปัตยกรรมที่ใช้ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างนั้น เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับมิติการทดลองเชิงวิศวกรรมเป็นหลัก ซึ่งเป็นการศึกษาที่แยกส่วนระหว่าง “โครงสร้าง” กับ “สถาปัตยกรรม” ดังนั้นแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม จึงถูกใช้เป็นกรอบ ในการศึกษาเพื่อเชื่อมโยงประเด็นสำคัญที่ได้จากแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมสู่การศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไม้แบบร่วมสมัย โดยมีคำถามของบทความดังนี้ 1) แนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมประกอบไปด้วยประเด็นอะไร 2) จากแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม มีประเด็นใดที่ส่งผลต่อการพิจารณาและศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไม้แบบร่วมสมัย

2. วัตถุประสงค์

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ทำความเข้าใจแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม 2) สังเคราะห์ประเด็นสำคัญจากแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมสู่การศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไม้แบบร่วมสมัย ซึ่งเป็นกรอบแนวคิดย่อยในการศึกษาลักษณะทางกายภาพสถาปัตยกรรมไม้แบบร่วมสมัย

3. วิธีการศึกษา

ใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรม จากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ (secondary document) เช่น หนังสือ บทความวิชาการ บทความวิจัย ซึ่งสืบค้นจากฐานข้อมูล Scopus และ Google scholar โดยใช้คำค้นหา (search term) ได้แก่ Structure in architecture, Structure in bamboo architecture, Bamboo structure เป็นต้น จากนั้นใช้แนวทางวิเคราะห์วรรณกรรม ในการวิพากษ์ข้อมูล เพื่อนำไปสู่ประเด็นในการพิจารณาและศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไม้แบบร่วมสมัย

4. ความหมายและความสำคัญของโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม

ตามประมวลศัพท์งานก่อสร้างอาคารทั่วไป ได้ให้นิยามว่า โครงสร้าง คือ สิ่งที่จัดสร้างขึ้นโดยการรวมหน่วยต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ให้ทำหน้าที่อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่าง ซึ่งต้องการมาตรฐานความมั่นคง ดังนั้น โครงสร้าง จึงหมายถึง สิ่งที่ถูกสร้างหรือประกอบกันขึ้นมา โดยมีหน้าที่รับน้ำหนัก ถ่ายทอดต่อ ๆ กัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทรงตัวอยู่ได้อย่างมีเสถียรภาพ (เฉลิม สุจริต, 2540)

โครงสร้างทางสถาปัตยกรรม (structure in architecture) คือ ระบบโครงสร้างของสถาปัตยกรรมหรืออาคาร ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อปิดล้อมหรือครอบคลุมขอบเขตของที่ว่างทางสถาปัตยกรรม (architectural space) รูปแบบของโครงสร้างขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานของพื้นที่ว่างทางสถาปัตยกรรม ที่มีลักษณะเฉพาะแล้วแต่กรณี (ขวลิต นิตยะ, 2544) โดยตัวมันเองต้องสามารถปกป้องที่ว่างภายใน (internal space) จากสภาพภูมิอากาศ

ภายนอก รวมถึงสามารถต้านทานแรงกระทำจากธรรมชาติ และมีคุณสมบัติสามารถรับน้ำหนักของแรงที่มากระทำต่าง ๆ ได้ เช่น แรงโน้มถ่วง แรงลม แรงแผ่นดินไหว น้ำหนักของน้ำฝน หรือหิมะ เป็นต้น (ชลธิ อิมอุตม, 2554)

การศึกษาโครงสร้างในภาพกว้าง ที่ไม่ใช่แค่มิติโครงสร้างในงานสถาปัตยกรรม พบว่า วัตถุประสงค์หรือสิ่งของล้วนต้องการโครงสร้างในการคงตัวของรูปทรง ไม่ว่าจะเป็น รถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ขวดน้ำ ฯลฯ และวัตถุเหล่านี้ยังต้องการพื้นที่ว่างเพื่อการใช้สอย อันก่อปรกັນขึ้นจากการปิดล้อมหรือการกำหนดขอบเขตของระบบโครงสร้าง (Rouhizadeh et al., 2019) เช่น ขวดน้ำที่ต้องการพื้นที่ในการบรรจุ น้ำ รูปทรงขวดเกิดจากการปิดล้อมของพลาสติกที่แข็งแรงเพื่อการคงรูปทรง ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง รูปทรงของขวด ที่ว่างภายในขวด (ปริมาตร) วัสดุที่ใช้ผลิตขวด และโครงสร้างที่ทำให้ขวดมีเสถียรภาพ ในทางกลับกันระบบโครงสร้างเหล่านี้ไม่ได้เกิดขึ้นจากฝีมือมนุษย์เท่านั้น ยังมีการรังสรรค์โครงสร้างตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เช่น เปลือกไข่ รังผึ้ง ไยแมงมุม ฯลฯ โครงสร้างตามธรรมชาติเหล่านี้ถูกหยิบยกเป็นแรงบันดาลใจในการออกแบบทั้งรูปทรงภายนอก และโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมอยู่บ่อยครั้ง (Sarkisian et al., 2010) รวมถึงถูกใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบสถาปัตยกรรม (Abdelsabour, 2019) โดยในประเด็นนี้สอดคล้องกับ เอลิม สุจริตกุล (2540) ซึ่งให้ข้อพิจารณาไว้ว่า 1) การศึกษารูปทรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ คือ แนวทางหนึ่งในการทำความเข้าใจระบบโครงสร้าง ร่วมกับเทคนิคของการประกอบรูปทรง (2) การวิเคราะห์รูปทรงธรรมชาติในประเด็น การรับแรง ลักษณะเนื้อวัสดุ การประกอบรูปทรง ขนาด ปริมาตร สามารถพัฒนาไปสู่การออกแบบรูปทรงโครงสร้างได้เช่นกัน

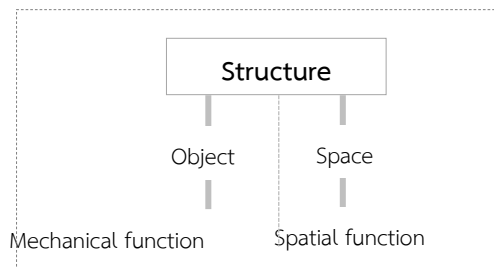
5. แนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม

แนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม คือ สิ่งจำเป็นต่อการทำความเข้าใจสถาปัตยกรรม ดังแนวคิดของ Vitruvius ที่ได้รับว่า องค์ประกอบพื้นฐานของสถาปัตยกรรมที่สำคัญมี 3 ประการ ได้แก่ ความมั่นคงแข็งแรง (firmitas) การใช้ประโยชน์ (utilitas) และ ความสวยงาม (venustas) แม้ว่าในศตวรรษที่ 17 Sir Henry Wotton ได้ขยายแนวคิดนี้ไปยังการแปลความเพิ่มเติม ได้แก่ คำว่า ‘firmness’ ‘commodity’ และ ‘delight’ (Macdonald, 2001) อย่างไรก็ตาม ‘firmness’ คือคุณสมบัติแรกที่ส่งผลต่อความสามารถของสถาปัตยกรรม เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้สถาปัตยกรรมมีเสถียรภาพ กล่าวคือ ระบบโครงสร้างเป็นส่วนหนึ่งของ ‘firmness’ ที่ทำให้อาคารไม่ไหวตัวที่ล่องลอย (Macdonald, 2018) ในประเด็นนี้สอดคล้องกับข้อคิดเห็นของ Schodek and Bechthold (2014) ในแง่มุมที่ว่า โครงสร้างคือวัตถุทางกายภาพรับแรงและน้ำหนัก จึงไม่ใช่สิ่งที่เป็นนามธรรม และชี้ให้เห็นว่าชิ้นส่วนของโครงสร้างทุกชิ้น ไม่ว่าจะเป็น เสา คาน ลวด ค้ำยัน ส่งผลต่อพฤติกรรมทางกายภาพซึ่งกันและกัน

ในขณะเดียวกัน Macdonald (2001) นำเสนอแนวคิดที่มีความใกล้เคียงกับ Schodek and Bechthold ในประเด็นที่ว่า โครงสร้างส่วนใหญ่เกิดจากการประกอบของชิ้นส่วนหลายชิ้น และประสิทธิภาพของโครงสร้างขึ้นอยู่กับ ประเภทของชิ้นส่วน คุณสมบัติวัสดุ และวิธีการเชื่อมต่อแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ Macdonald ยังได้แบ่งประเภทโครงสร้างตามพฤติกรรมการรับแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนอาคาร ซึ่งส่งผลให้ลักษณะของรูปทรงสถาปัตยกรรมมีความสัมพันธ์กับการรับแรงในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของอาคาร จากการศึกษาแนวคิดทางด้านโครงสร้าง

ทางสถาปัตยกรรมดังที่กล่าวมา พบว่า มีการศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมในประเด็นที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ จุดร่วมที่เป็นแกนหลักในการอธิบายบนพื้นฐานของตรรกะเชิงวิศวกรรมโครงสร้าง โดยมีความสอดคล้องกับหน้าที่หลักของโครงสร้าง คือ ความสามารถในการรับน้ำหนัก การถ่ายแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งสู่ฐานราก และลงไปยังพื้นดินในท้ายที่สุด อันเป็นการแสดงให้เห็นว่า บทบาทของโครงสร้างนั้นไม่ใช่แค่การยกวัตถุให้ลอยอยู่เหนืออากาศ แต่ยังต้องต้านทานแรงโน้มถ่วงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติด้วย

ขณะที่ Sandaker (2008) เสนอมุมมองเพิ่มเติมจากวิศวกรรมโครงสร้าง โดยขยายแนวคิดของ Schodek และ Macdonal ในประเด็นที่ว่า แม้ว่าโครงสร้างมีหน้าที่หลักคือเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับอาคาร เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการพังทลาย แต่หากพิจารณา “โครงสร้าง” ในบริบท “สถาปัตยกรรม” นั่นคือหน้าที่พื้นฐานทางวิศวกรรมเท่านั้น ดังนั้น Sandaker ได้เสนอแนวคิดของโครงสร้างที่สัมพันธ์กับมิติสถาปัตยกรรม ในประเด็นที่ว่า “โครงสร้างในสถาปัตยกรรม (structures in architecture) เป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่ว่างทางสถาปัตยกรรม (Architectural space)” สอดคล้องกับการให้คำจำกัดความความหมาย โครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ของ ชวลิต นิติยะ ซึ่งหน้าที่ของโครงสร้างอีกฝั่งหนึ่งชี้ให้เห็นว่า ทั้งมิติวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมไม่อาจละทิ้งจากกันได้ แม้ว่าบทบาทของโครงสร้าง คือการปฏิบัติหน้าที่หลักในเชิงกลศาสตร์ก่อน ในขณะที่ความจำเป็นทางด้านกายภาพ สถาปัตยกรรมจึงตามมา อย่างไรก็ตาม Sandaker เสนอแง่มุมในการพิจารณาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) mechanical function (หน้าที่ทางกลศาสตร์) (2) spatial function (หน้าที่เชิงพื้นที่) ดังภาพที่ 1 ซึ่งบทความนี้มุ่งเสนอประเด็นโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมเป็นหลัก ดังนั้นรายละเอียดประเด็น spatial function จึงอยู่นอกเหนือขอบเขตการนำเสนอในบทความนี้ หากมีโอกาสผู้เขียนจะนำเสนอในบทความขึ้นถัดไป

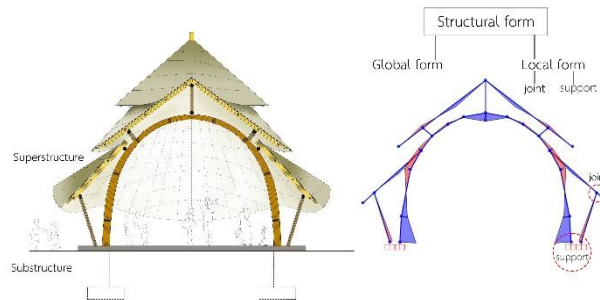


ภาพที่ 1 หน้าที่ของโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม

ที่มา: ดัดแปลงจาก Sandaker (2008)

นอกจากนี้ Sandaker (2008) ได้แบ่งระดับการพิจารณาโครงสร้างตามพฤติกรรมการรับแรง สามารถจำแนกออกเป็น 2 ระดับ คือ (1) global form เป็นการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในระดับภาพใหญ่ หรือลักษณะโดยรวมของระบบโครงสร้างทั้งหมด (2) local form เป็นการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในระดับตำแหน่งเฉพาะจุดที่วัสดุหรือชิ้นส่วนนั้น ๆ มาประกอบกัน เกิดเป็นข้อต่อ หรือรอยต่อ หรือจุดเชื่อมต่อ (ภาพที่ 2) ซึ่งการแบ่งระดับนี้

สามารถใช้เป็นกรอบในการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในโครงสร้างของอาคารทั่วไปได้ หากพิจารณาลงไปในระดับ Local form พบว่า การศึกษาประเด็นข้อต่อไผ่ (bamboo joint) ถือเป็นประเด็นสำคัญสำคัญที่ทำให้วัสดุไผ่แตกต่างจากวัสดุประเภทไม้ (Vahanvati, 2015) นอกจากนี้ระบบข้อต่อถือเป็นองค์ประกอบย่อยที่สำคัญในการประกอบกันขึ้นมาเป็นระบบโครงสร้าง โดยที่สามารถใช้ไผ่เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างได้ทั้งหมดหรือใช้ไผ่ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ ในการถ่ายเทแรง (Widyowijatnoko & Harries, 2020)



ภาพที่ 2 ระดับการพิจารณาแรงในโครงสร้าง

Clark and Pause (2012) อธิบายว่าโครงสร้าง คือ ระบบเสา ระบบระนาบ หรือการจัดเรียงระบบเหล่านี้นั้นด้วยความตั้งใจของผู้ออกแบบเพื่อที่จะส่งเสริมความคิดให้เกิดขึ้น บริบทดังกล่าวนี้ เสา คาน ผนัง คือการแสดงถึงนัยยะทางความคิดของความคิด รูปแบบ ความเรียบง่าย ความสม่ำเสมอ ความซับซ้อน ดังนั้น โครงสร้างจึงสามารถกำหนดที่ว่าง สร้างสรรค์พื้นที่ เชื่อมต่อเส้นทางสัญจร แนะนำทิศทางการเคลื่อนไหว จัดองค์ประกอบจนนำไปสู่การเชื่อมโยงชิ้นส่วนประกอบ ให้เกิดเป็นโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมที่มีคุณภาพ

จากการศึกษาคำจำกัดความของ เฉลิม สุจริต (2540) ขวลิต นิตยะ (2544) และ ชลธิ์ อิมอุตม (2554) และแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของ Clark and Pause (2012), Macdonald (2001), Sandaker (2008), Schodek and Bechthold (2014) สามารถจัดกลุ่มประเด็นที่เกี่ยวข้องได้ 4 กลุ่ม ดังนี้ (1) รูปทรงโครงสร้าง (2) คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ (3) การรับแรง (4) การกำหนดที่ว่างทางสถาปัตยกรรม ประเด็นเหล่านี้จะนำไปสู่การศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไผ่แบบร่วมสมัย ว่ามีประเด็นใดที่เกี่ยวข้องซึ่งกันและกันบ้าง

6. การแบ่งประเภทโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม

การแบ่งประเภทโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมตามลักษณะรูปทรง มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจลักษณะกายภาพ และการรับแรงตามชนิดของโครงสร้าง ซึ่งส่งผลต่อวัสดุที่นำมาก่อสร้างและรูปทรงสถาปัตยกรรม โดย ขวลิต นิตยะ (2544) แบ่งประเภทโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมตามลักษณะรูปทรง ออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

-solid structure คือ โครงสร้างที่พบได้ในสิ่งก่อสร้างแบบโบราณ ใช้วัสดุประเภท หิน ดิน อิฐในการรับแรงอัด ดังนั้นลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นจึงมีความทึบตัน ผนังหนา ถ่ายแรงโดยตรงไปตรงมา ไม่ซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น พีระมิด เจดีย์ต่าง ๆ เชื่อนเก็บน้ำ กำแพง เป็นต้น

-skeleton structure คือ โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชิ้นส่วน (members) หลายชิ้นมาประกอบกัน หรือมีลักษณะเป็นโครงเฟรม (frame structure) มีการถ่ายแรงจากชิ้นส่วนหนึ่งไปสู่ชิ้นส่วนหนึ่ง ส่วนใหญ่รับแรงดัด (แรงดึงและแรงอัดในท่อนเดียวกัน) เช่น panel truss, space truss และ portal frame ในรูปแบบต่าง ๆ เป็นต้น

-surface structure คือ โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นพื้น มีลักษณะการถ่ายแรงแบบกระจายไปทุกส่วนของพื้นโครงสร้างนั้น ๆ วัสดุส่วนใหญ่เป็นคอนกรีตและเหล็ก เช่น thin shell, space frame, suspended roof, folded plate, hyperbolic paraboloid เป็นต้น

การเลือกใช้งานทั้งสามโครงสร้างนี้ สามารถนำมาผสมผสานกันตามแนวคิด คุณลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ประโยชน์ใช้สอย ที่ว่าง และการรับแรง รวมถึงข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม เฉลิม สุจริตกุล (2540) ได้เสนอแนะว่ารูปทรงโครงสร้างในงานสถาปัตยกรรม ควรมีคุณลักษณะดังเช่น 1) มีความงามเป็นที่พึงพอใจ 2) มีความเหมาะสมในการใช้สอย มีแผนผังที่อิสระไม่จำกัดตัวเอง และส่วนที่เป็นชิ้นส่วนโครงสร้าง ควรมีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุด เพื่อจะได้ใช้ประโยชน์ของพื้นที่อาคารได้เต็มที่ 3) มีความมั่นคงทนทาน โดยคำนึงถึงทั้งความแข็งแรงของส่วนย่อยและโครงใหญ่ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาระดับการรับแรงในโครงสร้าง (global form and local form) ตามที่ Sandaker นำเสนอ

ในขณะที่โครงสร้างในสถาปัตยกรรมเฝ้านแบบร่วมสมัยนั้น หากพิจารณาลักษณะโครงสร้างตามรูปทรงที่สามารถมองเห็นได้โดยตรง พบว่า มีลักษณะโครงสร้างอยู่ 2 ประเภท คือ skeleton structure และ surface structure (Kumsingsree & Rittironk, 2020) ซึ่งเป็นการรับน้ำหนักของลำไผ่ พบทั้งลำไผ่เดี่ยว หรือลำไผ่มัดรวมหลายลำ ส่วนการนำไผ่ไปใช้งานในระบบ solid structureเกิดขึ้นในลักษณะของการนำไผ่มาซิกไปเป็นวัสดุเสริมความแข็งแรงในผนังดิน หรือเสริมแรงร่วมกับวัสดุอื่น ๆ ในงานงานเชิงทดลอง ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้โดยตรง อย่างเช่นคอนกรีตเสริมไผ่มาซิก

7. โครงสร้างทางสถาปัตยกรรม: ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติวัสดุและรูปทรง

ในวงการสถาปัตยกรรมมีสถาปนิกผู้เชี่ยวชาญระบบโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม เช่น Felix Candela , Santiago Calatrava, Pier Luigi Nervi, Kengo Kuma, Richard Rogers, Renzo Piano เป็นต้น หากพิจารณาไปในผลงาน สิ่งสำคัญที่ทำให้การออกแบบสถาปัตยกรรมแตกต่างจากสถาปัตยกรรมอื่น ๆ อย่างมีนัยยะสำคัญ คือ การผนวกสาระสำคัญของความเป็นโครงสร้าง เข้ากับรูปทรงสถาปัตยกรรม และคุณสมบัติวัสดุ ให้สามารถรวมเป็นหนึ่งเดียวกันได้ ในทำนองเดียวกันมุมมองที่ Sandaker (2008) และ Macdonal (2001) ได้นำเสนอนั้น ลึกลงไปแล้วการก่อปรของลักษณะทางโครงสร้างนั้นเกิดจากวัสดุก่อนหรือไม่ ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุและรูปทรงของโครงสร้างในสถาปัตยกรรมควรจะเป็นอย่างไร ข้อถกเถียงนี้ไม่ได้เป็นการตัดสินว่ากระบวนการใดถูกหรือผิด แต่หากมองสถาปัตยกรรมเป็นวัตถุทางกายภาพ ย่อมมีมุมมองในกระบวนการอันนำมาซึ่งรูปทรงของโครงสร้างทาง

สถาปัตยกรรมที่ต่างกันไป เมื่อย้อนกลับไปยังต้นทางความคิดในการเคลื่อนไหวการวิพากษ์สถาปัตยกรรมในมิติเหตุผลเชิงโครงสร้าง ทำให้เนื้อหาสาระทางโครงสร้าง และวัสดุที่นำมาก่อสร้างนั้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปแบบทางสถาปัตยกรรมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ช่วง พ.ศ.2403 (ค.ศ.1860) Viollet-le-Duc ได้จุดประกายให้เห็นถึงความสำคัญของวัสดุสถาปัตยกรรมที่ได้เฝ้าการใช้วัสดุในสถาปัตยกรรม ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างและลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด ที่ส่งผลต่อวิธีการก่อสร้างที่เจาะจงด้วย จากมุมมองดังกล่าวส่งผลให้ฐานแนวคิดนี้มีความชัดเจนในแง่ที่ว่า กระบวนการสร้างสรรค์ที่เลือกใช้วัสดุตามคุณสมบัติเชิงกล และคุณลักษณะทางกายภาพตามของวัสดุ มีความสอดคล้องกับลักษณะทางประสาทสัมผัส (sensorial aspects) นั่นคือข้อสนับสนุนในแง่ของวัสดุทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการออกแบบสถาปัตยกรรม (Wastiels & Wouters, 2008) เช่น ผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมของ Louis I. Kahn สถาปนิกผู้หลงในธรรมชาติของวัสดุประเภทอิฐ ซึ่ง Kahn ได้ทำความเข้าใจธรรมชาติของวัสดุ ก่อนนำมาใช้ก่อสร้าง ไม่เพียงแต่ความเข้าใจในคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเท่านั้น แต่ยังหมายรวมถึงเข้าใจในเทคนิคการก่อสร้าง และพฤติกรรมในการรับแรงอัดของอิฐด้วย

นอกจากนี้ยังมีสถาปนิกผู้ที่ให้ความสนใจการออกแบบรูปทรงที่สัมพันธ์กับวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ Pier Luigi Nervi แม้ว่าการออกแบบและเทคนิคการก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กของเขาส่วนใหญ่เกิดขึ้นในศตวรรษที่ 19 แต่ผลงานของ Nervi ยังคงมีอิทธิพลต่อสถาปัตยกรรมในศตวรรษที่ 20 เห็นได้จากสนามกีฬาที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดสองสนาม ได้แก่ The Giovanni Berta Sports Stadium และ Olympic Flaminio Stadium (Iori & Poretti, 2019) ส่วนผลงานการออกแบบอื่น ๆ ล้วนแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของรูปทรง วัสดุ และโครงสร้าง ซึ่งส่งอิทธิพลนี้ไปสู่สถาปนิกในยุคถัดมา เช่น Marcel Breuer, Felix Candela, Amancio Williams, Eduardo Catalano เป็นต้น (Calvo-Salve, 2018) จากตัวอย่างการใช้งานวัสดุประเภทอิฐ และการใช้งานวัสดุประเภทคอนกรีต นำไปสู่การเปรียบเทียบการใช้งาน ไม้ ในฐานะวัสดุที่เป็นจุดตั้งต้นของการออกแบบโครงสร้างในสถาปัตยกรรม อันเป็นแนวทางหนึ่งที่ตรงข้ามกับการระบุวัสดุก่อสร้างที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการออกแบบ จากการศึกษาแนวคิดทางด้านโครงสร้าง พบว่า ก่อนที่จะเกิดเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นมาประกอบกันได้ ต้องเกิดจากความเข้าใจธรรมชาติของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างก่อน ทั้งในมิติคุณสมบัติเชิงกล และคุณลักษณะทางกายภาพของวัสดุเหล่านั้น

ในทำนองเดียวกัน ไม้ ถือเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการใช้เป็นโครงสร้างในสถาปัตยกรรม รวมถึงโครงสร้างช่วงพาดกว้างในสะพาน จึงสามารถพบเห็นอาคารเหล่านี้ได้ในพื้นที่ที่มีไม้เป็นพืชท้องถิ่น เช่น ละตินอเมริกา ซึ่งมีสภาพที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของไม้ (Hong et al., 2019) โดยมีไม้กวดัวที่แข็งแรง หน้าตัดใหญ่ เหมาะสมกับงานโครงสร้าง ส่งผลให้รูปทรงและลักษณะกายภาพสถาปัตยกรรมมีขนาดใหญ่ ดังตัวอย่างผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมของ Simon Veléz และการออกแบบสะพานของ Jörg Stamm ที่ทำให้เกิดการแสดงออกทางโครงสร้างและสถาปัตยกรรมอันทันสมัยและร่วมสมัยมากขึ้น ในแง่ของความเป็นอาคารช่วงกว้างที่มีพื้นที่ใช้สอยเพิ่มขึ้น มีระดับความสูงที่เอื้อต่อการใช้งาน เช่น Contemplation bamboo pavilion และ Catedral Sin Religión (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 Catedral Sin Religión, Pereira, Colombia ออกแบบโดย Simón Vélez

ที่มา: <https://arqa.com/arquitectura/catedral-sin-religion.html>

ในทางเดียวกันอินโดนีเซียถือเป็นประเทศหนึ่งในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่มีป่าไผ่อุดมสมบูรณ์ โดยมีสัดส่วนพื้นที่ป่า 2.4 % จากพื้นที่ป่าไม้ทั้งหมดของประเทศ (Piazza et.al., 2007) พบการกระจายสายพันธุ์กว่า 145 ชนิด ตัวอย่างชนิดพันธุ์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการก่อสร้าง ได้แก่ *Dendrocalamus asper*, *Gigantochloa apus*, and *Bambusa blumeana* ซึ่งไผ่ทั้ง 3 สายพันธุ์นี้ มีคุณสมบัติเชิงกลที่เอื้อต่อการนำไปตัดโค้ง ส่งผลให้สถาปนิกในประเทศอินโดนีเซียมีความนิยมในการใช้ไผ่ไปใช้เพื่อให้เกิดรูปทรงที่อ่อนช้อยที่ตอบสนองต่อแนวคิดในการออกแบบของสถาปนิก ในมิติของการสร้างสรรค์รูปทรงอินทรีย์ (organic form) ที่มีเส้นสายอิสระ มากกว่าวัสดุประเภทไม้และคอนกรีต รวมถึงมีกลมกลืนไปกับสภาพธรรมชาติของพื้นที่ตั้ง ยกตัวอย่างเช่น ผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมไผ่แบบร่วมสมัยของ Effan Adhiwira และ IBUKU เป็นต้น (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 Sokasi Cooking School, Four Seasons Sayan Bali ออกแบบโดย IBUKU

ที่มา: <https://ibuku.com/sokasi-cooking-school-four-seasons-sayan-bali/>

8. แนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม และการศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไผ่แบบร่วมสมัย

จากการจัดกลุ่มประเด็นที่เกี่ยวข้องกับแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ (1) รูปทรงโครงสร้าง (2) คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ (3) การรับแรง (4) การกำหนดที่ว่างทางสถาปัตยกรรม ในขณะที่การทบทวนวรรณกรรมการศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไผ่แบบร่วมสมัย พบว่า มีนักวิจัยที่ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมของสถาปัตยกรรมไผ่แบบร่วมสมัย เช่น Maurina & Henatta (2014), Esti Asih

Nurdiah (2016), Wirabuana & Maurina (2017), Xu et al., (2017) เป็นต้น โดยมีประเด็นที่เกี่ยวข้องกับแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมดังนี้

- คุณสมบัติเชิงกลของไม้ที่ส่งผลต่อการออกแบบรูปทรงโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม

นอกจากการยกตัวอย่างของ Simón Vélez และ Jörg Stamm ในหัวข้อที่ผ่านมาแล้วนั้น ยังมีการศึกษาของ Xu et al., (2017) เสนอประเด็นที่ว่า แม้ว่าไม้สามารถต้านทานแรงดึงได้สูง รับแรงอัดได้ดี และมีความเหนียว ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดัดงอ อย่างไรก็ตามระบบโครงสร้างแบบดั้งเดิม ไม่ได้ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติดังกล่าวของไม้อย่างเต็มที่ ดังนั้น จึงมีการนำไม้ไปใช้เป็นโครงสร้างเฟรมโค้ง ซึ่งมีข้อดีคือ (1) การผสมผสานระบบโครงสร้างเฟรมโค้ง เข้ากับระบบโครงถัก สามารถผลักดันให้เกิดอาคารไม้ช่วงพาดกว้าง (2) เป็นการขยายขอบเขตของการใช้งานพื้นที่ ที่ปราศจากการรบกวนจากระบบเสาตรงกลาง (3) ประสิทธิภาพของ cantilever structure ในระบบเฟรม นำไปสู่ปริมาตรของรูปทรงที่สามารถสร้างความต่อเนื่องของที่ว่างและแสงธรรมชาติเข้าด้วยกัน (4) ในเชิงนามธรรม เส้นสายอิสระถูกนำเสนอผ่านภาพตัวแทนความหมาย ที่สอดคล้องกับวัฒนธรรมท้องถิ่นในแต่ละพื้นที่ เช่น การอ้างอิงเส้นโค้งของหลังคาสถาปัตยกรรมจีนในอาคาร China Pavilion และการใช้เส้นรอบรูปของดอกบัว ในอาคาร Vietnam Pavilion ณ Milan Expo 2015 รวมไปถึงการใช้เส้นโค้งของโบราณวัตถุ เพื่อแสดงถึงแนวความคิดของอาคาร Bamboo Exhibition Hall ประเทศกัมพูชา เป็นต้น ในทำนองเดียวกัน Maurina & Prastyatama (2017) ได้แสดงความคิดเห็นว่า การนำไม้ไปใช้เป็นโครงสร้างหลักของอาคาร คือการเปลี่ยนแปลงภาพลักษณ์ใหม่ของวัสดุไม้ในวาทกรรม ไม้ซุงของคนยาก สู่วัสดุยั่งยืนที่มีบทบาทต่อการออกแบบสถาปัตยกรรมร่วมสมัย ซึ่งสามารถพบเห็นได้ในผลงานการออกแบบสถาปัตยกรรมของสถาปนิกหลายท่าน เช่น Vo Throng Nghia, Bamboo build, Chiangmai Life Construction เป็นต้น ซึ่งประเด็นการศึกษาเหล่านี้มีความสอดคล้องกับประเด็นจากแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมในสองแง่มุม คือ (1) รูปทรงโครงสร้าง และ (2) คุณสมบัติวัสดุที่ใช้

- ประเภทชิ้นส่วนโครงสร้างและจุดรองรับแรง

Schodek, L. D., & Bechthold (2014) ได้แบ่งประเภทโครงสร้างตามชิ้นส่วนและการก่อสร้างออกเป็น 2 แบบ คือ (1) องค์ประกอบเชิงเส้น (Line-forming elements) (2) องค์ประกอบเชิงพื้นผิว (surface-forming elements) ซึ่งนำไปสู่การศึกษาของ Maurina and Prastyatama (2017) ในประเด็นการขึ้นรูปทรงของสถาปัตยกรรมไม้นั้นจึงถูกจัดอยู่ในประเภท line-forming elements และนำไปสู่ลักษณะการจัดชิ้นส่วนโครงสร้างออกเป็น 2 ลักษณะ คือ (1) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบกระจายออกจากตรงกลาง (centralized configuration) และ (2) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเส้น (linear configuration) ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างเหล่านี้ทำหน้าที่กระจายแรงอัดตามแนวแกนผ่านจุดรองรับแรง (structural supports) แล้วลงไปยังฐานราก โดยที่จุดรองรับแรงเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ (1) จุดรองรับแรงแบบยึดแน่น (fixed support) (2) จุดรองรับแรงแบบหมุนได้แต่ไม่เคลื่อนที่ หรือจุดรองรับแรงแบบบานพับ (hinged support) (3) จุดรองรับแรงแบบเคลื่อนที่ได้ (roller support) (Sandaker et al., 2011) เนื่องจากความแตกต่างของจุดรองรับแรงที่เชื่อมต่อกันระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างกับฐานรากนั้น จะส่งผลต่อความต้านทานการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างด้วย

กล่าวคือ ในกรณีที่ขึ้นส่วนโครงสร้างโค้ง ใช้จุดรองรับแรงแบบ fixed support ทั้งสองข้าง พบว่า สามารถต้านทานแรงกระทำได้มากกว่า 2-3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างโค้งที่ใช้จุดรองรับแรงแบบ hinged support ทั้งสองข้าง (Maurina & Prastyatama, 2017) ซึ่งประเด็นการศึกษาเหล่านี้มีความสอดคล้องกับประเด็นจากแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมในสองแง่มุม คือ (1) รูปทรงโครงสร้าง (2) การรับแรง

- รูปแบบการนำไผ่มาใช้ในโครงสร้างและระยะช่วงพาด

การนำไผ่มาใช้เป็นโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม สามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะ คือ (1) การใช้ไผ่แบบลำเดี่ยว (bamboo pole) (2) การใช้ไผ่แบบหลายลำมัดรวมเข้าด้วยกัน (bundle bamboo) (3) การใช้ไผ่แบบผ่าซีกมัดรวมเข้าด้วยกัน (bundle bamboo split) ซึ่งรูปแบบของการใช้ไผ่นี้ส่งผลต่อลักษณะของรูปทรงโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม กล่าวคือ การใช้ไผ่ขนาดเล็กหลายลำมัดเข้าด้วยกัน หรือไผ่ผ่าซีกเข้าด้วยกันแล้วนำไปตัดโค้งสามารถทำให้เกิดเส้นสายที่อิสระ ได้มากกว่าการใช้ไผ่แบบลำเดี่ยว ในขณะเดียวกันการตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของไผ่ด้านมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (MOE: Modulus of Elasticity) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความแข็งแรงของวัสดุพบว่าไผ่มีค่า MOE อยู่ที่ 23.775-89.225 kg/cm² ในขณะที่ไม้มีค่า MOE อยู่ที่ 60.00-125.000 kg/cm² ดังนั้นความยืดหยุ่นของวัสดุประเภทไผ่จึงน้อยกว่าวัสดุประเภทไม้ (Maurina & Prastyatama, 2017) ในขณะเดียวกันเทคนิคการใช้ไผ่แบบมัดหลายลำเข้าด้วยกัน ยังเป็นการเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนโครงสร้างมากกว่าหนึ่งชิ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงของระบบโครงสร้างเพิ่มขึ้นด้วย ในประเด็นนี้ถือเป็นการลดข้อจำกัดระยะช่วงพาดของอาคาร (span) นอกจากนี้รูปแบบการนำไผ่มาใช้งานและลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ทำให้เกิดการขยายการใช้งานพื้นที่ ซึ่งแก้ไขปัญหาของอาคารขนาดเล็ก รวมไปถึงทำให้เกิดโครงสร้างอาคารไผ่ช่วงพาดกว้าง และเพิ่มศักยภาพให้กับไผ่ในฐานะวัสดุโครงสร้างอาคารช่วงพาดกว้าง ตามที่ Simon Veléz ได้กล่าวไว้ โดยประเด็นการศึกษาเหล่านี้มีความสอดคล้องกับประเด็นจากแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมในสามแง่มุม คือ (1) รูปทรงโครงสร้าง (2) คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ (3) การรับแรง

- ข้อต่อและการเชื่อมต่อลำไผ่ (bamboo joints and joinery)

ตามกรอบแนวคิดของ Sandaker (2008) การพิจารณาข้อต่อและการเชื่อมต่อลำไผ่ ถือเป็นการพิจารณาในระดับย่อยเฉพาะจุดที่วัสดุหรือชิ้นส่วนหนึ่ง ๆ มาประกอบกัน (local form) จนเกิดเป็นระบบโครงสร้างทั้งหมด (global form) จากลักษณะทางกายภาพ ทำให้ไผ่มีข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน ในเรื่องขนาดความยาวของลำไผ่ที่เหมาะสมในการก่อสร้าง ซึ่งมีระยะอยู่ที่ 6-8 เมตร เหตุเพราะเมื่อลำไผ่ยังมีความยาวมากเท่าไรจะทำให้ผนังลำไผ่บางลง ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของไผ่ที่ใช้ในการก่อสร้างจะลดลงตามไปด้วย (Lopez, 2003) ประเด็นนี้จึงนำไปสู่การพัฒนาการเชื่อมต่อลำไผ่หลายลำเข้าด้วยกันด้วยเทคนิคที่หลากหลาย เดิมทีไผ่ถูกใช้งานในฐานะวัสดุก่อสร้างสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น โดยใช้เทคนิคผูกมัดลำไผ่เข้าด้วยกัน ซึ่งใช้วัสดุประเภทหวายหรือเชือก เช่น เชือกป่าน เชือกปาล์ม การผูกมัดด้วยเชือกแก้ปัญหาเรื่องแรงเสียดทานเท่านั้น ทำให้น้ำหนักที่ส่งผ่านข้อต่อแต่ละชิ้นส่วนถูกจำกัด แม้ว่าจะมีการใช้สลักเดือยหรือลิ้มไม้ร่วมด้วย อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับแรงจนถึงจุดแตกหัก (strength) และความสามารถในการต้านทานการเสียรูป (stiffness) น้อยกว่าการใช้โบลท์ ส่วนการใช้เทคนิคสลักเดือยหรือลิ้มไม้ไม่มีข้อดี คือ น้ำหนักเบา ย่อยต่อการทำงาน และสามารถนำไปปฏิบัติได้จริงโดยการฝึกทักษะช่าง (Lefevre et al., 2019) ปัจจุบันเทคนิคการผูกมัดด้วยเชือก มีการพัฒนาโดยใช้วัสดุที่รัดลำไผ่หลากหลายรูปแบบ ยกตัวอย่าง

เช่น เชือกโพลีเอสเตอร์ ลวด เชื่อมขัดรัดทอสแตนเลส เป็นต้น (Hong et al., 2019) ในขณะเดียวกันข้อจำกัดด้านความหลากหลายของหน้าตัดลวด (Heterogeneous dimensions) ที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งลวด (Di Paola & Mercurio, 2020) รวมไปถึงความเป็นท่อนกลวง และความบางของผนังเนื้อลวด กล่าวได้ว่าเป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อเทคนิคในการเชื่อมต่อลวด (Hong et al., 2020) ในขณะที่การทำงานที่เกี่ยวข้องกับข้อต่อลวดถือเป็นเรื่องที่ทำหายและยังเปิดโอกาสในการศึกษาอยู่มาก อย่างไรก็ตามยังมีการศึกษาทดลองความเป็นไปได้เพื่อหาแนวทางในการเชื่อมต่อลวดหลายรูปแบบ (Vahanvati, 2015)

จากการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าว มีประเด็นที่ใช้ในการพิจารณาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมลวดแบบร่วมสมัย ดังนี้ (1) รูปทรงโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม (2) คุณสมบัติเชิงกลของลวดที่ใช้ในการก่อสร้าง (3) ประเภทชิ้นส่วนโครงสร้างและจุดรองรับแรง (4) รูปแบบการนำลวดมาใช้โครงสร้างและระยะช่วงพาด (5) ข้อต่อและการเชื่อมต่อลวด ซึ่งทั้ง 5 ประเด็นนี้มีความเกี่ยวข้องกับแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมในสามแง่มุมคือ (1) รูปทรงโครงสร้าง (2) คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ (3) การรับแรง ซึ่งเชื่อมโยงไปยังหน้าที่เชิงกลศาสตร์ (mechanical function) ตามกรอบแนวคิดของ Sandaker (2008) ส่วนประเด็นการกำหนดที่ว่างทางสถาปัตยกรรม ซึ่งสัมพันธ์กับมิติของหน้าที่เชิงพื้นที่ (spatial function) นั้นมีรายละเอียดของประเด็นอยู่มาก จึงอยู่นอกเหนือการนำเสนอในครั้งนี้

9. สรุป

แนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ทำให้ระบบโครงสร้างไม่ใช่แค่ชิ้นส่วนที่ส่งผ่านแรงกระทำตามหลักวิศวกรรมเท่านั้น แต่ยังสร้างความเข้าใจลึกซึ้งไปถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ก่อปรกั้นเป็นรูปทรงโครงสร้าง เนื่องจากวัสดุแต่ละประเภทยังมีคุณลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างเพื่อรับแรงกระทำที่ต่างกัน กล่าวคือ วัสดุบางประเภทรับแรงอัด บางประเภทรับแรงดึง บางประเภทรับแรงดัด (แรงอัดและดึงในชิ้นเดียว) เป็นต้น นอกจากนี้แนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ยังมีหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดขอบเขตของที่ว่างทางสถาปัตยกรรม ดังที่ ชวลิต นิตยะ (2544) ได้ให้คำจำกัดความไว้รวมถึง Sandaker (2008) และ Clark and Pause (2012) ได้กล่าวถึงโครงสร้างในมิติของหน้าที่เชิงพื้นที่ที่สามารถสรุปกลุ่มประเด็นจากแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ได้ 4 กลุ่มคือ (1) รูปทรงโครงสร้าง (2) คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ (3) การรับแรง (4) การกำหนดที่ว่างทางสถาปัตยกรรม โดยที่กลุ่มที่หนึ่งถึงกลุ่มที่สาม มีความเกี่ยวเนื่องกับการศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมลวดแบบร่วมสมัย ในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้ (1) รูปทรงโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม (2) คุณสมบัติเชิงกลของลวดที่ใช้ในการก่อสร้าง (3) ประเภทชิ้นส่วนโครงสร้างและจุดรองรับแรง (4) รูปแบบการนำลวดมาใช้โครงสร้างและระยะช่วงพาด (5) ข้อต่อและการเชื่อมต่อลวด ในขณะเดียวกันทั้ง 5 ประเด็น สัมพันธ์กับมิติหน้าที่เชิงกลศาสตร์ (mechanical function) ตามที่ เฉลิม สุจริตกุล (2540) และ Sandaker (2008) ได้ให้ข้อคิดเห็นเอาไว้ สามารถจัดหมวดหมู่ระดับการพิจารณาแรงในโครงสร้างใน 2 ระดับ คือ

1) ระดับ global form ซึ่งประกอบไปด้วยประเด็น (1) รูปทรงโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม (2) คุณสมบัติเชิงกลของลวดที่ใช้ก่อสร้าง (3) รูปแบบการนำลวดมาใช้โครงสร้างและระยะช่วงพาด

2) ระดับ local form ซึ่งประกอบไปด้วยประเด็น (1) ประเภทชิ้นส่วนโครงสร้างและจุดรองรับแรง (2) ข้อต่อและการเชื่อมต่อลำไผ่

โดยในลำดับต่อไปประเด็นเหล่านี้จะถูกพัฒนาเป็นปัจจัยย่อยที่ต้องทำการศึกษาและเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์ในอาคารกรณีศึกษา เพื่อนำไปสู่การตรวจสอบว่าปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของสถาปัตยกรรมไผ่แบบร่วมสมัยอย่างไร

แม้ว่าในบทความนี้มุ่งเน้นการนำเสนอประเด็นจากแนวคิดโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมที่นำไปสู่การศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมไผ่แบบร่วมสมัย อันเป็นการศึกษาในระดับย่อย อย่างไรก็ตาม การศึกษาในระดับองค์รวมของกายภาพสถาปัตยกรรมไผ่แบบร่วมสมัยนั้น ยังมีหลายมิติที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็นบริบททางสังคมและสิ่งแวดล้อม ที่ทำให้การใช้งาน ไผ่ ได้เปลี่ยนแปลงภาพลักษณ์และการสื่อความหมายจากวาทกรรม “ไม่ชุงของคนยาก” สู่ “วัสดุยั่งยืน” (sustainable materials) หรือวัสดุที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (eco-friendly materials) ตั้งแต่ช่วงปลายศตวรรษที่ 20 อันเป็นบริบทที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการตื่นตัวของประชาคมโลกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จนเกิดเป็นความเคลื่อนไหวของการใช้ไผ่เป็นวัสดุก่อสร้างในสถาปัตยกรรม ดังปรากฏให้เห็นในหลายพื้นที่ทั่วโลก รวมถึงในไทยด้วยเช่นกัน นอกจากนี้บทความนี้ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นให้กับผู้ที่สนใจในการศึกษาโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม โครงสร้างทางสถาปัตยกรรมที่ใช้ไผ่เป็นวัสดุก่อสร้าง รวมไปถึงโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมที่ใช้วัสดุอื่น ๆ ซึ่งยังคงเปิดพื้นที่การศึกษาเอาไว้ในหลายประเด็น

10. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ระดับดุษฎีบัณฑิต เรื่องสถาปัตยกรรมไผ่แบบร่วมสมัย (Contemporary Bamboo Architecture) หลักสูตรสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้างคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้รับทุนสนับสนุนจากกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

11. เอกสารอ้างอิง

- เฉลิม สุจริต. (2540). *วัสดุและการก่อสร้างสถาปัตยกรรม*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชลธิ อัมมฤต. (2554). *ระบบโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม*. (พิมพ์ครั้งที่ 4). สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ขวลิต นิตยะ. (2544). *โครงสร้างทางสถาปัตยกรรม*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัชบุพพรรณ คำสิงห์ศรี, และ วันดี พิณจรัสสิน. (2565). ไผ่ในฐานะวัสดุก่อสร้างในงานสถาปัตยกรรม ช่วง ค.ศ. 2010-2021. *วารสารวิชาการการออกแบบสภาพแวดล้อม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 9(1), 174-199.
- สรารุณ สังข์แก้ว, อัจฉรา ธีระวัฒนานนท์, และ กิตติศักดิ์ จินดาวงศ์. (2554). *ไผ่ในเมืองไทย*. บ้านและสวน.

- Abdelsabour, I. (2019). INVESTIGATING BIO-MORPHISM APPROACH TO ENHANCE STRUCTURE'S CREATIVITY AND EFFICIENCY, JEAS, *Journal of Engineering and Applied Science, Faculty of Engineering, Cairo University*. 66, 491-513.
- Calvo-Salve, M. (2018). Influences of the engineer Pier Luigi Nervi on the work of the architect Marcel Breuer. *Proceedings 6th ICCH, Brussels, Belgium*, 417-424.
- Clark, R. H., & Pause, M. (2012). *Precedents in architecture: analytic diagrams, formative ideas, and partis*: John Wiley & Sons.
- Di Paola, F., & Mercurio, A. (2020). *Design and Digital Fabrication of a Parametric Joint for Bamboo Sustainable Structures*. Paper presented at the Advances in Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping, Cham.
- Disén, K., & Clouston, P. L. (2013). Building with bamboo: a review of Culm connection technology. *Journal of Green Building*, 8(4), 83-93.
- Gupta, A., & Kumar, A. (2008). Potential of Bamboo in Sustainable Development. *Asia Pacific Business Review*, 4(3), 100-107. doi:10.1177/097324700800400312
- Gutu, T. (2013). A study on the mechanical strength properties of bamboo to enhance its diversification on its utilization. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2(5), 314-319.
- Hong, C., Li, H., Lorenzo, R., Wu, G., Corbi, I., Corbi, O., . . . Zhang, H. (2019). Review on connections for original bamboo structures. *Journal of Renewable Materials*, 7(8), 713-730.
- Hong, C., Li, H., Xiong, Z., Lorenzo, R., Corbi, I., Corbi, O., . . . Zhang, H. (2020). Review of connections for engineered bamboo structures. *Journal of Building Engineering*, 30, 101-324. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101324
- Hongpeng Xu, Beier Xu, & Jianmei Wu. (2017). *The Research of Curve Element Used in Original Bamboo Architecture Design Paper*. presented at the UIA 2007 Seoul World Architect Congress
- Iori, T., & Poretti, S. (2019). Pier Luigi Nervi: an engineer, an architect and a builder. *Informes de la Construcción*, 71(553), e282.
- Kaminski, S., Lawrence, A., Trujillo, D., & King, C. (2016). Structural use of bamboo: Part 2: Durability and preservation. *Struct Eng*, 94(10), 38-43.
- Kumsingsree, R., & Rittironk, S. (2020). Types of Architectural Structure in Bamboo Architecture (Urban Built Environment beyond the Global Pandemic: 17th International Conference of Asia Institute of Urban Environment). *Journal of Asian urban environment*, 71-77.

- Lefevre, B., West, R., O'Reilly, P., & Taylor, D. (2019). A new method for joining bamboo culms. *Engineering Structures*, 190, 1-8.
- Liese, W. (1985). *Anatomy and properties of bamboo. Paper presented at the Proceedings of the International Bamboo Workshop.*
- Lopez, O. H. (2003). *Bamboo: the gift of the gods*: O. Hidalgo-Lopez.
- Macdonald, A. J. (2001). *Structure and architecture* (Second Ed.): Routledge.
- Macdonald, A. J. (2018). *Structure and architecture* (3rd ed.). Routledge.
- Maikol, S. M. Y., Maksimovich, S. V., Ivanovna, B. G., & Ainur, S. (2020). Bamboo structures for modern sustainable architecture. *ISVS eJ*, 7, 27-39.
- Manandhar, R., Kim, J.-H., & Kim, J.-T. (2019). Environmental, social and economic sustainability of bamboo and bamboo-based construction materials in buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 18(2), 49-59. doi:10.1080/13467581.2019.1595629
- Maurina, A., & Prastyatama, B. (2017). Bamboo Architectonic: Experimental Studies Using Bundled-Bamboo- Split (BBS) . *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 7, 850. doi:10.18517/ijaseit.7.3.2131
- Piazza, M., Lobovikov, M., Paudel, S., Ren, H., & Wu, J. (2007). *World bamboo resources - A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005.*
- Rouhizadeh, A., Hafezi, M. R., Farrokhzad, M., & Panahi, S. (2019). Inspiration from Nature in the Training of Structural Design in Architecture. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 15(68), 59-72.
- Sandaker, B. N. (2008). *On span and space: Exploring structures in architecture*. Routledge.
- Sandaker, B. N., Eggen, A. P., & Cruvellier, M. R. (2011). *The structural basis of architecture*. (2nd ed.). Routledge.
- Sarkisian, M., Lee, P., Long, E., & Shook, D. (2010). *Organic and Natural Forms in Building Design. Paper presented at the Structures Congress 2010.*
- Schodek, L. D., & Bechthold, M. (2014). *Structures*. (7th ed.). London: Pearson Education, Inc.
- Song, X., Zhou, G., Jiang, H., Yu, S., Fu, J., Li, W., . . . Peng, C. (2011). Carbon sequestration by Chinese bamboo forests and their ecological benefits: assessment of potential, problems, and future challenges. *Environmental Reviews*, 19(NA), 418-428.
- Vahanvati, M. (2015). *The Challenge of connecting bamboo*. Paper presented at the de 10th World Bamboo Congress, Damyang.

- Wastiels, L., & Wouters, I. (2008). *Material Considerations in Architectural Design: A study of the aspects identified by architects for selecting materials*.
- Widyowijatnoko, A., & Harries, K. A. (2020). 20 - Joints in bamboo construction. In K. A. Harries & B. Sharma (Eds.), *Nonconventional and Vernacular Construction Materials (Second Edition)* (pp. 561-596): Woodhead Publishing.
- Witte, D. (2018). Contemporary Bamboo Housing in South America: Challenges & Opportunities for Building in the Informal Sector.
- ZERI Foundation. (2012). *ZERI Pavilion for EXPO 2000*. Retrieved from www.zeri.org