

Academic article

สถาปัตยกรรมไผ่ร่วมสมัย: รูปทรงสถาปัตยกรรม และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง Contemporary Bamboo Architecture: Architectural form and structural configuration

รัชณูพรรณ คำสิงห์ศรี^{1*} วันดี พินิจวรสิน¹ อรศิริ ปาณินท์¹ ปารเมศ กำแหงฤทธิ์รงค์¹
Rutchanoophan Kumsingsree^{1*} Wandee Pinijvarasin¹ Omsiri Panin¹ Paramas Kamhangritirong¹

Received: 28 October 2024 | Revised: 2 March 2025 | Accepted: 21 May 2025

<https://doi.org/10.55003/acaad.2024.274642>

บทคัดย่อ

เนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล ทำให้ไผ่ถูกนำมาใช้งานแบบเต็มลำ ในการก่อรูปทรงโครงสร้างที่สามารถรับแรงและน้ำหนักบรรทุกทุก รวมถึงสร้างสรรค์รูปทรงสถาปัตยกรรมที่หลากหลายได้ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและค้นหาความสัมพันธ์ของรูปทรงสถาปัตยกรรม และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ภายใต้ลักษณะการก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้นของลำไผ่ ใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน ประกอบด้วย การสำรวจกายภาพสถาปัตยกรรม การสัมภาษณ์บุคคล และการจำลองพฤติกรรมแรงในโครงสร้าง โดยมีอาคารกรณีศึกษาจำนวน 4 อาคาร และใช้การวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ การวิเคราะห์เนื้อหา การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างกรณีศึกษา การวิเคราะห์และประมวลผลแรงกระทำต่อชิ้นส่วนโครงสร้างในรูปแบบการจำลองโครงสร้างเชิงเส้น หรือแบบจำลองพื้นฐานอย่างง่าย ผลการศึกษาพบว่า (1) รูปทรงสถาปัตยกรรมแบบอินทรีย์ ที่มีสันหลังคาโค้งยาว เกิดจากการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างใน 3 ลักษณะ คือ การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเส้นตรง การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเส้นโค้ง และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบผสมผสาน ในขณะที่รูปทรงสถาปัตยกรรมแบบเรขาคณิต ที่มีหลังคาทรงกรวยคว่ำ เกิดจากการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบรัศมี (2) การออกแบบรูปทรงสถาปัตยกรรมที่มีความโค้งมน เป็นผลมาจากประโยชน์ใช้สอยเชิงหน้าที่ของรูปทรงที่กลม ร่วมกับแนวคิดและแรงบันดาลใจของสถาปนิก ส่วนการสร้างความปลอดภัยในรูปทรง สามารถทำได้โดยออกแบบให้ชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นมีระดับความสูงที่แตกต่างกัน (3) สกูลไผ่รวก โดยเฉพาะไผ่รวกดำ มีบทบาทสำคัญต่อการใช้งานในลักษณะดัดโค้ง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ในการหักมากกว่า 98.07 MPa เนื้อเยื่อมีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อการแตกหัก จึงถูกนำไปใช้ในการกำหนดเส้นความโค้งในระบบโครงสร้างหลังคา ด้วยวิธีการมัดรวบลำ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับกวางตุ้งหรือแป๊ะไค้ ในหลังคาทรงกระดองเต่าของชาติพันธุ์ไทดำ (4) โครงสร้างไผ่ถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยระบบค้ำยันหรือยึดรั้ง เพื่อเพิ่มความเสถียรในการรับแรงลมและแรงดันข้าง ซึ่งถือเป็นลักษณะเฉพาะที่พบได้ในการก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบชิ้นส่วนเชิงเส้น เช่นเดียวกันกับระบบโครงสร้างอาคารไม้ และอาคารเหล็ก

คำสำคัญ: ไผ่ สถาปัตยกรรมไผ่ร่วมสมัย รูปทรงอินทรีย์ การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง การก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น

Abstract

Due to its physical characteristics and mechanical properties, bamboo is used in culm construction that can withstand force and loads and create various architectural forms. This article aims to study and explore the relationship between architectural form and structural configuration under the line-forming elements with bamboo culm. A mixed-method research methodology was executed, which consisted of a

¹ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹ Doctor of Philosophy Program in Built Environment, Faculty of Architecture, Kasetsart University

*ผู้เขียนต้นฉบับ: อีเมล: rutchanoophan.k@msu.ac.th

physical architectural survey, structured interview and structural force behavior simulations on four case studies. The data were synthesized by content analysis, cross-case comparative analysis and structural simulations in line element or simplified analysis model.

The study found that (1) Organic architectural form, with the long curve roof ridge, is formed by structural configuration in three features: Linear configuration, Curve configuration, and Mixed configuration. Meanwhile, the geometric architectural form, with a conical roof, is formed by the Centralized configuration. (2) The architectural design with curves is a result of the function of form that is related to aerodynamic design and conceptual design from architects. For creating fluidity in the roof, it can be done by designing each structural frame to have different height levels. (3) *Thyrsostachys*, especially *Thyrsostachys oliveri* Gamble has an important role in bending applications because it has a Modulus of rupture of more than 98.07 MPa. Its tissue is highly resilient and resistant to bundle techniques to fracture, so it is used to create the curvature lines in the roof structure by bamboo bundle techniques which is similar to the Kwang-toop or curved purlin in Tortoise shell-shaped roof by Tai Dam. (4) Bamboo structures are held together by a bracing system to provide stability against wind and lateral forces. This increases the stability of the structure to withstand lateral loads, such as wind forces which is a characteristic finding in line-forming elements as well as timber and steel building structure systems.

Keywords: Bamboo, Contemporary Bamboo Architecture, Organic Form, Structural Configuration, Line-forming Elements

1. บทนำ

จากคุณสมบัติของไม้ที่ว่า “ปลูกทดแทนง่าย เส้นใยเหนียวแน่น เติบโตไว ทนใช้งาน” ทำให้ “ไม้” ไม่เพียงเป็นพืชอเนกประสงค์ที่เกี่ยวข้องกับวิถีชีวิตท้องถิ่นเท่านั้น แต่ยังเป็นทรัพยากรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับบริบทของความยั่งยืนในระดับสากลอีกด้วย โดยในปี ค.ศ. 2015 องค์กรไผ่และหวายโลก (International Bamboo and Rattan Organization) ชี้ให้เห็นความสำคัญของไผ่ในฐานะทรัพยากรที่เชื่อมโยงกับกรอบนโยบายขององค์การสหประชาชาติ ภายใต้เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals) ในมิติที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การลดความยากจน พลังงานสะอาด การพัฒนาที่อยู่อาศัย เป็นต้น (International Bamboo and Rattan Organization (INBAR), 2015, Online) ส่วนในฐานะวัสดุก่อสร้าง ไผ่มีความสามารถในการลดอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้มากกว่าวัสดุอุตสาหกรรมอื่น ๆ จึงทำให้ไผ่มีบทบาทในแง่ของวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เหตุเพราะอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด โดยคิดเป็น 37% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก การผลิตและการใช้วัสดุประเภทซีเมนต์ เหล็ก และอลูมิเนียม ก่อให้เกิดมลพิษทางคาร์บอนจำนวนมาก (UN Environment Programme, 2023, Online) ดังนั้นไผ่จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่ถูกนำมาใช้งานในสถาปัตยกรรมด้วย นอกจากนี้ในฐานะพืช ไผ่จัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่เพื่อตอบสนองต่อการขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศด้วยโมเดลเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) พ.ศ. 2564-2570 การสนับสนุนให้ปลูกสวนไผ่ จะสามารถเพิ่มสัดส่วนของไผ่ที่สามารถนำมาใช้งานในระบบอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทยได้มากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันงานวิชาการที่มีการศึกษาเกี่ยวกับไผ่ ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการศึกษาจากมุมมองของพฤกษศาสตร์ วนศาสตร์ และวัสดุทางวิทยาศาสตร์ ในขณะที่การศึกษาในเชิงทฤษฎีและวิจัยเชิงปฏิบัติการสำหรับการนำไผ่ไปประยุกต์ใช้ในสถาปัตยกรรมนั้นค่อนข้างมีน้อย อย่างไรก็ตามงานวิจัยในแนวทางดังกล่าวนี้มีแนวโน้มที่จะดึงดูดความสนใจจากนักวิจัยเพิ่มขึ้น (Huang, 2019, p. 30) โดยมีการใช้งานไผ่ดิบที่ไม่ผ่านการแปรรูป (raw bamboo) ในลักษณะลำกลม (round bamboo) ทั้งในสถาปัตยกรรมและระบบโครงสร้างรับน้ำหนัก (load-bearing structure) (Huang, 2019, p. 40) เนื่องจากไผ่มีเส้นใยที่หนาแน่นและเหนียว โดยมีความหนาแน่นของกลุ่มมัดท่อลำเลียงน้ำและอาหารเป็นจำนวนมากบริเวณด้านนอกใกล้ผิวไผ่และคอร่า ๆ ลดน้อยลงเมื่อถึงผนังด้านในใกล้บริเวณหน้าตัดกลวง ทำให้ไผ่สามารถรับแรงดึงบริเวณผิวไผ่ได้ถึง 400 MPa (N/mm²) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการรับแรงดึงของเหล็กเส้น (Minke, 2016, p. 22) สอดคล้องกับการทดสอบความสามารถ

ในการรับแรงดึงของไม้ตงและไม้สีกุ อันเป็นสายพันธุ์ที่นิยมในงานก่อสร้างของประเทศไทย พบว่า ชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบที่ได้จากเนื้อไม้ตง บริเวณที่อยู่ใกล้ผิวนอกของผนังลำไม้ มีกำลังรับแรงดึงตำแหน่งกลางปล้องเท่ากับ 734 MPa และไม้สีกุ เท่ากับ 490 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นส่วนทดสอบที่ได้จากเนื้อไม้ตงบริเวณที่อยู่ใกล้กับหน้าตัดกลางของลำ 3.65 เท่า และไม้สีกุ 3.14 เท่า (Narmluk & Makesan, 2013, p. 90) นอกจากนี้สีกุไม้สีกุ (*Bambusa blumeana*) ยังมีค่าความสามารถในการต้านทานการดัดงอ (Modulus of Rupture: MOR) สูงกว่าไม้ โดยสีกุไม้สีกุมีค่าอยู่ที่ 99.8 MPa ซึ่งมากกว่าไม้โอ๊คแดง (98.5 MPa) ไม้สน (59.3 MPa) และไม้ซีดาร์ (51.7 MPa) (Tam, 2018, Online)

จากข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ไม้ทนต่อการแตกหักและยืดหยุ่นได้ดีกว่าไม้บางชนิด สังเกตได้จากคุณสมบัติในการกลม เมื่อต้นไม้ปะทะกับแรงลมจะไม่หักโค่นเหมือนต้นไม้ชนิดอื่น ทำให้มีความสามารถขึ้นรูปทรงโค้งมน ดังเช่นที่พบในงานจักสาน งานหัตถกรรม งานสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นที่มีรูปทรงหลังคาโค้งมน รวมถึงงานสถาปัตยกรรมร่วมสมัยรูปทรงอินทรีย์ (organic form) อันแสดงถึงศักยภาพในการรับแรงดัดและแรงดึงผ่านกายภาพความเป็นลำยาวของไม้ มีความสามารถในการขึ้นรูปทรงสถาปัตยกรรมได้หลากหลาย และใช้งานได้โดยไม่ผ่านการแปรรูป ถือเป็นข้อได้เปรียบที่ทำให้ไม้ถูกนำมาใช้ก่อสร้างในลักษณะที่แตกต่างจากไม้ อันเป็นจุดดึงดูดที่สร้างความท้าทายในการทำงานให้กับสถาปนิก วิศวกร รวมถึงนักวิจัยที่สนใจในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับศักยภาพของไม้ในฐานะวัสดุโครงสร้างและวัสดุก่อสร้างสถาปัตยกรรมร่วมสมัย โดยในบทความนี้นิยามคำว่า สถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัย หมายถึง สถาปัตยกรรมในรูปแบบร่วมสมัย ซึ่งใช้ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างและวัสดุโครงสร้างร่วมกับวัสดุในปัจจุบัน แสดงถึงบทบาทของการใช้งานไม้ในบริบทการออกแบบร่วมสมัย และเผยให้เห็นถึงศักยภาพของคุณสมบัติเชิงกลและคุณลักษณะทางกายภาพความเป็นลำ สามารถรับแรงภายในอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง และแรงภายนอกที่เป็นแรงกระทำด้านข้างได้

ในขณะเดียวกันจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า แนวทางการศึกษาในเชิงแนวคิดทฤษฎีสถาปัตยกรรม ที่ผสมผสานกับแนวคิดทางด้านโครงสร้างนั้นยังปรากฏไม่มากนัก สอดคล้องกับข้อคิดเห็นของ Huang (2019, p. 30) ดังที่กล่าวมาข้างต้น การศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นการแสดงให้เห็นถึงความสามารถและศักยภาพของไม้ในฐานะวัสดุก่อสร้างและวัสดุโครงสร้าง โดยเฉพาะในพื้นที่ประเทศไทยที่ไม้สามารถเจริญเติบโตได้ดี มีชนิดพันธุ์ท้องถิ่นที่เหมาะสมกับการก่อสร้าง พบการใช้งานเชิงโครงสร้างขนาดเล็กตั้งแต่อดีต อย่างเช่นเรือนเครื่องผูก จนถึงอาคารช่วงพาดกว้างในปัจจุบัน ซึ่งยังเปิดพื้นที่ทางการศึกษาเอาไว้ แม้ว่าจะมีการศึกษาของ Maurina and Prastyatama (2017) ได้ทำการศึกษาผ่านสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัยที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ โดยเนื้อหาบางส่วน กล่าวถึงความสามารถของไม้ในการก่อรูปทรงโครงสร้าง ด้วยการใช้งานไม้แบบเต็มลำ อย่างไรก็ตามงานดังกล่าวยังมีช่องว่างในการอภิปรายถึงประเด็น ความสัมพันธ์ของรูปทรงสถาปัตยกรรมและการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ภายใต้ลักษณะการก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น ในขณะที่การศึกษาของ Nurdiah (2016) นำเสนอศักยภาพของไม้ในฐานะวัสดุโครงสร้าง ที่สามารถรับแรงกระทำและสร้างสรรค์รูปทรงสถาปัตยกรรมตามแนวคิดของสถาปนิก โดยพบว่าระบบโครงสร้างหลังคา คือปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความแตกต่างของสถาปัตยกรรมรูปทรงอินทรีย์ แต่ทว่ายังขาดการอธิบายถึงลักษณะดังกล่าวว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร ซึ่งทั้งสองผลงานยังเปิดพื้นที่เพื่อเติมเต็มช่องว่างทางการศึกษาเอาไว้ โดยเฉพาะประเด็นรูปทรงสถาปัตยกรรม และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง บนพื้นฐานการใช้งานไม้ตามคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรง และคุณลักษณะทางกายภาพความเป็นลำ นำมาสู่คำถามของบทความนี้ว่า ความสัมพันธ์ของรูปทรงสถาปัตยกรรม และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ในงานสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัยเป็นอย่างไร

นอกจากนี้ยังพบข้อสังเกตต่อแนวทางการศึกษาสถาปัตยกรรมไม้ที่มีการก่อสร้างเสร็จ ถือเป็นกระบวนการหนึ่งในการเปลี่ยนแปลงการรับรู้ของผู้คนที่มีการใช้งานไม้ จากวัสดุชั่วคราวในงานสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น สู่วัสดุที่มีความคงทนถาวรในสถาปัตยกรรมร่วมสมัย เช่น งานวิจัยของ Maurina and Henatta (2014), Nurdiah (2016), Wirabuana and Maurina (2017), Xu et al. (2017), Crolla (2017), Lara and Espinosa (2018) เป็นต้น โดยผลงานของนักวิจัยเหล่านี้ แสดงถึงการยกระดับสถาปัตยกรรมร่วมสมัยให้เป็นที่ยอมรับ ผ่านอาคารกรณีศึกษาที่มีชื่อเสียง ไม่เพียงแต่ในประเทศอินโดนีเซีย เวียดนาม เท่านั้น แต่ยังขยายผลสู่การศึกษาในบริบทของประเทศไทย ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการใช้งานทรัพยากรไม้ในหลายมิติด้วยเช่นกัน

2. วัตถุประสงค์การศึกษา

- 2.1 ศึกษาลักษณะการก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น รูปทรงสถาปัตยกรรม และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง
- 2.2 ค้นหาความสัมพันธ์ของรูปทรงสถาปัตยกรรม และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง
- 2.3 สรุปลงความรู้ออกแบบรูปทรงสถาปัตยกรรมและการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ภายใต้ลักษณะการก่อ

รูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น

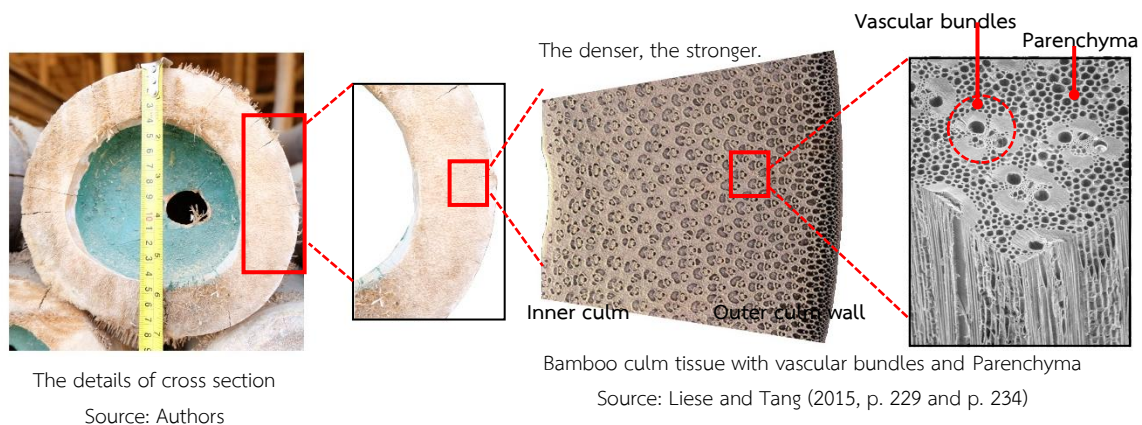
3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 คุณสมบัติของไผ่ในฐานะวัสดุก่อสร้าง

3.1.1 ลักษณะกายวิภาคที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและความยืดหยุ่น

การศึกษาโครงสร้างทางกายวิภาคของไผ่ คือพื้นฐานในการทำความเข้าใจต่อคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ รวมถึงพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของไผ่ เนื่องจากไผ่เป็นพืชในตระกูลหญ้าที่มีระบบกิ่งและแขนงที่แข็งแรง มีกายวิภาคเป็นปล้อง (internodes) มีหน้าตัดหนาและเนื้อเยื่อปริมาณมาก มีลักษณะภายในเป็นท่อนกลวงและคั่นด้วยข้อ (node) ทำหน้าที่คล้ายเหล็กเส้นที่เสริมให้ลำไผ่แข็งแรง รวมถึงมีลักษณะเป็นโพรงไม้ที่ตัน แม้ว่าไผ่จะไม่มียางเหมือนไม้ แต่ความแตกต่างของกระบวนการสร้างเนื้อเยื่อ ส่งผลให้ไผ่มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นที่สูง เหตุเพราะองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไผ่ ประกอบไปด้วย เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fibers) 40% มัดท่อลำเลียง (vascular bundles) 10% และเนื้อเยื่อพาราไคมา (Parenchyma) 50% (รูปที่ 1) ซึ่งมีสารลิกนินทำหน้าที่ยึดหรือประสานเส้นใยต่าง ๆ เข้าด้วยกัน (Liese, 1985, p. 196) โดยผนังของเส้นใยเซลลูโลส ประกอบด้วยผนังชั้นปฐมภูมิ ชั้นทุติยภูมิ และชั้นตติยภูมิ ซึ่งผนังชั้นทุติยภูมิประกอบด้วยชั้นไมโครไฟบริล (microfibrils) จำนวนมากที่มีทิศทางแตกต่างกัน ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เส้นใยมีความยืดหยุ่นสูง และเมื่อรวมกับเซลล์ประเภทอื่นแล้ว จึงทำให้ลำต้นมีความยืดหยุ่นได้ดี รวมถึงเนื้อเยื่อมีความเหนียวตามไปด้วย (Liese & Tang, 2015, p. 234) นำไปสู่ความสามารถในการใช้งานในลักษณะตัดโค้ง ดังที่พบในงานหัตถกรรมและสถาปัตยกรรมบางพื้นที่

นอกจากนี้ลำไผ่ยังมีค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยมากกว่าไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน ขณะเดียวกันค่าความหนาแน่นของวัสดุ (density) และความยาวของเส้นใย (fiber length) มีความสัมพันธ์ทางตรงกับมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity: MOE) และยังสัมพันธ์กับการรับแรงอัดตามแนวนานสั้นหรือตามแนวลำยาว (Liese & Tang, 2015, p. 230) โดยปริมาณความหนาแน่นของเส้นใย ยังมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงของลำไผ่ รวมถึงคุณสมบัติทางกลที่เพิ่มมากขึ้น (Daram, 2019, p. 9)



รูปที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไผ่

Figure 1 Chemical composition of bamboo culm

3.1.2 คุณสมบัติเชิงกลของไผ่และข้อพิจารณาในการเป็นชิ้นส่วนโครงสร้าง

เนื่องจากไผ่เป็นวัสดุธรรมชาติที่ให้ความรู้สึกเป็นวัสดุชั่วคราว บ่อยครั้งการนำไผ่ไปใช้ในการก่อสร้างจึงถูกตั้งคำถามถึงความแข็งแรงของมันอยู่เสมอ ทั้งในแง่ของการรับแรงและความคงทนถาวรของวัสดุ ปัจจุบันมีผลงานวิจัยหลายเรื่องที่เป็นข้อสนับสนุนในการนำไผ่มาใช้เป็นวัสดุโครงสร้าง โดยทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกล หรือกลสมบัติของไม้ (mechanical properties) อันหมายถึง คุณสมบัติของไม้หรือวัสดุใด ๆ ที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำ ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของไผ่ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกชนิดพันธุ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท (Sompoh et al., 2013, p. 16)

ในการศึกษาของ Vivas et al. (2019, pp. 1-21) ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (systematic reviews) เกี่ยวกับประเด็นการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของไม้ ได้แก่ 1) การรับแรงอัด (Compressive strength) 2) การรับแรงดึง (Tensile strength) 3) การรับแรงเฉือน (Shear strength) 4) การรับแรงดัด (Bending strength) ได้แก่ (4.1) ค่าสัมประสิทธิ์ในการหัก (Modulus of rupture: MOR) เป็นค่าการต้านการแตกหักหรือความแข็งแรง (strength) ของไม้ในการดัด (4.2) ค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity: MOE) เป็นค่าการต้านการโก่งเดาะหรือความแข็งตึง (stiffness) โดยคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงทั้ง 5 อย่างนั้น เป็นการสังเคราะห์ข้อมูลจากบทความที่ได้รับการเผยแพร่ จำนวน 43 ฉบับ และมีกลุ่มตัวอย่างไม้จากหลากหลายชนิดพันธุ์ สามารถสรุปค่าเฉลี่ยคุณสมบัติเชิงกลของไม้จากงานของ Vivas et al. (2019, pp. 1-21) เปรียบเทียบกับการทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกลของไม้ตอง (Dendrocalamus asper) ไม้ซาง (Dendrocalamus strictus) ไม้สีสุก (Bambusa blumena) ไม้ป่า (Bambusa bambos) และไม้รวกใหญ่หรือไม้รวกดำ (Thyrsostachys oliveri Gamble) จากการศึกษาของ Sompoh et al. (2013, pp. 1-28) และไม้ตะเคียนทองจากกรมป่าไม้ (Royal Forest Department, 2005, pp. 2-3) รวมถึงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กได้ดังตารางที่ 1

จากเกณฑ์การแบ่งประเภทของไม้ ตามมาตรฐานกรมป่าไม้ กำหนดให้พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ในการหัก ซึ่งแบ่งเป็นสามช่วง ได้แก่ (1) ไม้เนื้อแข็ง มีค่าสัมประสิทธิ์ในการหักมากกว่า 98.07 MPa (2) ไม้เนื้อแข็งปานกลาง มีค่าสัมประสิทธิ์ในการหักอยู่ในช่วง 58.85-98.07 MPa (3) ไม้เนื้ออ่อน มีค่าสัมประสิทธิ์ในการหักต่ำกว่า 58.85 MPa และให้เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของไม้อื่น ๆ ที่ไม่เป็นที่รู้จัก เทียบเคียงกับคุณสมบัติเชิงกลของไม้ตะเคียนทองเสมอ เนื่องจากไม้ตะเคียนทองจัดอยู่ในไม้เนื้อแข็ง ที่เป็นที่ยอมรับทั้งในแง่ของความแข็งแรงและความทนทาน นอกจากนี้ ไม้ยังสามารถใช้การอ้างอิงหน่วยแรงที่ยอมให้เป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง เมื่อจำแนกประเภทของไม้ตามมาตรฐาน มยผ. 1104-2552 ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Daram, 2019, p. 12)

แม้ว่าไม้สามารถรับแรงอัดได้ใกล้เคียงกับไม้ตะเคียนทอง อย่างไรก็ตามไม้แต่ละชนิดพันธุ์มีความสามารถในการรับแรงแตกต่างกัน โดยไม้ที่มีขนาดหน้าตัดใหญ่และมีผนังลำไม้ที่หนาแน่นด้วยนั้น สามารถรับแรงอัดได้สูง อย่างเช่น ไม้ตอง ซึ่งสามารถนำไปเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างประเภทเสารับแรงอัดได้ ส่วนไม้ที่มีขนาดหน้าตัดเล็ก แต่มีผนังลำไม้ที่หนาแน่นด้วยนั้น สามารถพิจารณาการใช้งานในลักษณะมัดรวบหลายลำด้วยเชือกหรือสายรัดทอสแตนเลส (stainless steel clamp) เพื่อเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงได้เช่นกัน (Chaowana et al., 2021, p. 15) ขณะที่หากพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ในการหัก พบว่า ไม้ตอง ไม้ซาง ไม้สีสุก จัดอยู่ในประเภทไม้เนื้อแข็งปานกลาง ส่วนไม้ป่าและไม้รวกดำ จัดอยู่ในประเภทไม้เนื้อแข็ง คือ มีความแข็งแรงในการดัดสูงกว่า 98.07 MPa ตามมาตรฐานของกรมป่าไม้ (Sompoh et al., 2013, p. 21) คุณสมบัติดังกล่าวทำให้ไม้ถูกนำไปใช้งานในลักษณะดัดโค้ง หรือองค์ประกอบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องการความโค้ง ดังปรากฏให้เห็นในสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัยในหลายพื้นที่ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ดังนั้นการพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลของชนิดพันธุ์ และคุณลักษณะทางกายภาพความเป็นลำยาว ข้อ ปล้อง ท่อน และการใช้งานแบบเต็มลำ จึงมีส่วนสำคัญในการกำหนดลักษณะโครงสร้างและรูปทรงสถาปัตยกรรมด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติเชิงกลของไม้

Table 1 Average bamboo mechanical property value.

Mechanical Property	Average Value ¹ (MPa)	Bamboo species for construction in Thailand ² (MPa)					Hopea Odorata Roxb ³ (ไม้ตะเคียนทอง) (MPa)	Steel ⁵ (MPa)
		D.asper ³ (ไม้ตอง)	D.strictus ³ (ไม้ซาง)	B.blumena ³ (ไม้สีสุก)	B.bambos ³ (ไม้ป่า)	T.oliveri Gamble ³ (ไม้รวกดำ)		
Compressive strength	52	68.67	56	66.50	54.23	57	51	250 ⁵
Tensile strength	159	358.33	349	387.67	131.33	-	-	410 ⁵
Shear strength	9	9.80	13.13	12.27	9.15	4.30	15	-
Modulus of Rupture	120	83.67	83	92	164.33	120	115	-
Modulus of Elasticity	16000	59533	18833	57767	33233	19700	11790	21000 ⁵

Source: ¹ Vivas et al. (2019, pp. 1-21)

² Daram (2019, p. 13) ชนิดพันธุ์ไม้ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการก่อสร้างของไทย 5 สกุล ได้แก่ สกุลไผ่ตง (Dendrocalamus) สกุลไผ่ป่า (Bambusa) สกุลไผ่รวก (Thyrsostachys) สกุลไผ่ไร่ (Gigantochloa) สกุลไผ่สีทอง (Schizostachyum) โดยสกุลไผ่ตงและสกุลไผ่ป่ามีชนิดพันธุ์ที่เหมาะสมมากที่สุด

³ Sompoh et al. (2013, pp. 1-28) การทดสอบคุณสมบัติของไม้ไผ่บางชนิดเพื่อการก่อสร้าง

⁴ Royal Forest Department (2005, p. 2-3)

⁵ Awalluddin et al. (2017, p. 9)

3.2 รูปทรงสถาปัตยกรรม

3.2.1 รูปทรงที่ก่อให้เกิดพื้นที่ว่าง

รูปทรง คือ ส่วนสำคัญในการจัดองค์ประกอบพื้นฐานในงานสถาปัตยกรรม หากพิจารณารูปทรงสามมิติในประเด็นที่ก่อให้เกิดพื้นที่ว่างที่สามารถใช้สอยได้ สามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ (Tiptus, 2002, p. 7) ได้แก่

(1) รูปทรงปิดล้อม (closed form) คือ ลักษณะของรูปทรงสามมิติที่ถูกครอบคลุมด้วยวัสดุหรือพื้นผิวที่ห่อหุ้มอยู่ โดยที่เนื้อที่ภายในถูกตัดขาดหรือแยกออกจากพื้นที่ภายนอก ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน หรือมีความสัมพันธ์ต่อกันแต่น้อยมาก เช่น โบสถ์ที่ไม่มีช่องเปิด บ้านอิกลูของชาวเอสกีโมในขั้วโลกเหนือ พีระมิดและที่อยู่อาศัยในแถบทะเลทราย ฯลฯ เหตุเพราะต้องการการปิดล้อมที่ว่างภายในจากสภาพภูมิอากาศภายนอก ซึ่งหากเปรียบเทียบรูปทรงปิดล้อมที่เกิดขึ้นในสถาปัตยกรรมไม้ สามารถพบได้ในบริเวณที่มีอากาศแบบแห้งแล้ง เช่น สถาปัตยกรรมไม้พื้นถิ่นของชาวซิดามา (Sidama) และชาวดอร์ส (Dorze) ในแอฟริกา

(2) รูปทรงที่เชื่อมโยงกับภายนอก (open form) คือ ลักษณะของรูปทรงสามมิติที่พื้นที่ว่างภายในสามารถเชื่อมโยงกับพื้นที่ภายนอกได้ แสดงถึงความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมและธรรมชาติมากกว่ารูปทรงปิดล้อม ทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศและแสงธรรมชาติ ซึ่งหากเปรียบเทียบรูปทรงที่เชื่อมโยงกับภายนอกที่เกิดขึ้นในสถาปัตยกรรมไม้ สามารถพบได้ในบริเวณที่มีอากาศแบบเขตร้อนชื้น เช่น เรือนเครื่องผูก เกียงนา ศาลา เป็นต้น ในขณะที่สถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัย ในภูมิภาคเอเชียอาคเนย์สามารถจัดอยู่ในกลุ่มนี้ เนื่องจากอิทธิพลของสภาพอากาศในเขตร้อนชื้น ข้อบ่งชี้เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะของรูปทรงทั้งแบบปิดล้อมและแบบที่เชื่อมโยงกับภายนอกนั้น มีความสัมพันธ์กับลักษณะของสภาพภูมิอากาศในพื้นที่

3.2.2 ลักษณะรูปทรงในงานสถาปัตยกรรมไม้พื้นถิ่น

เมื่อพิจารณาไปยังการก่อรูปของรูปทรง พบว่า วัสดุคือสิ่งสำคัญหนึ่ง ที่นำไปสู่การสร้างสรรค์รูปทรงที่หลากหลาย หากพิจารณาไม้ในฐานะวัสดุก่อสร้าง เบื้องต้นพบว่าไม้ถูกใช้งานในฐานะวัสดุประกอบสร้างสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น ซึ่งเป็นการใช้งานในมิติที่ตอบสนองต่อวิถีชีวิต เพื่อการยังชีพมากกว่าการสร้างความสะดวกสบายเพื่อจรรโลงจิตใจ ส่งผลให้ระบบการก่อสร้างแบบเสาและคานาถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างหลัก ซึ่งมีระยะช่วงพาดเสาน้อยกว่า 4.00 เมตร เนื่องจากการก่อสร้างที่ไม่ซับซ้อนบนพื้นฐานการใช้แรงงานคนที่มีอยู่ ร่วมกับภูมิปัญญาเชิงช่าง และเครื่องมือที่สามารถจัดหาได้ในช่วงเวลานั้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสภาพภูมิอากาศของแต่ละพื้นที่ รวมถึงมีลักษณะรูปทรงเป็นไปตามประโยชน์ใช้สอย ดังนั้นจึงพบเห็นสถาปัตยกรรมไม้พื้นถิ่น หรือเรือนพักอาศัยที่ก่อสร้างด้วยไม้ผ่านระบบโครงสร้างหลังคาที่มีรูปทรงเรียบง่าย เช่น หลังคาจั่ว หลังคาเพิงหมาแหงน เป็นต้น ในขณะเดียวกันยังพบลักษณะของหลังคาที่มีรูปทรงโค้งมน เช่น หลังคาปีกนกโค้งมน ของชาติพันธุ์ไทใหญ่ บ้านปางหมู ต.ปางหมู อ.เมือง จ.แม่ฮ่องสอน และหลังคาทรงกระดองเต่า (Tortoise shell-shaped roof house) ของชาติพันธุ์ไทดำ บ้านแม่ประจันต์ ต.วังไคร้ อ.ท่ายาง จ.เพชรบุรี (รูปที่ 2) ซึ่งเป็นเรือนไม้จริงผสมไม้ โดยมีลักษณะรูปทรงหลังคาด้านสกัดที่โค้งมน อันเนื่องมาจากเหตุผลทางด้านการแก้ไขปัญหาเรื่องน้ำรั่ว เทคนิคการก่อสร้าง และวัสดุก่อสร้าง ซึ่งใช้ไผ่รวกที่หาได้ในพื้นที่ เป็นไผ่ขนาดเล็กนำมามัดรวมแบบเหลื่อมกันเพื่อเพิ่มความยาวให้เกิดเป็นแปที่โค้ง หรือที่เรียกว่า กวางตุ๊บ สำหรับรัดรอบตลอดความยาวของหลังคา นอกจากนี้กวางตุ๊บยังช่วยในการเสริมความแข็งแรงให้กับระบบโครงสร้างหลังคาทั้งหมดด้วย เนื่องจากไผ่รวกสามารถรับแรงดึงได้ดี (Punpairoj, 2011, p. 30)



รูปที่ 2 หลังคาทรงกระดองเต่า ของชาติพันธุ์ไทดำ

Figure 2 Tortoise shell-shaped roof house by Tai Dam

Source: (a.) Poomchai Punpairoj (2011, p. 26),

(b.) Wandee Pinijvarasin (2011), and (c.) Wandee Pinijvarasin (2018)

3.2.3 ลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรม ในงานสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัย

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับรูปทรงในงานสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัย สามารถจำแนกลักษณะของรูปทรงได้ดังนี้ (1) รูปทรงเรขาคณิต (geometric form) คือ ลักษณะของรูปทรงที่มีพื้นฐานจากรูปร่างสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม วงกลม วงรี เป็นต้น ซึ่งสามารถพบสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัยรูปทรงเรขาคณิตในลักษณะโครงถักไม้รูปทรงต่าง ๆ ที่เกิดจากการประกอบกันของรูปสามเหลี่ยม เช่น โครงถัก (Bamboo truss) โครงสร้างโดม (Bamboo geodesic dome) โครงสร้างไฮเปอร์โบลิก พาราโบลอยด์ (Bamboo hyperbolic paraboloid) เป็นต้น ลักษณะของรูปทรงเรขาคณิตให้ความรู้สึกมั่นคง แข็งแรง มีเสถียรภาพ มีความสมดุล (2) รูปทรงอินทรีย์ (organic form) คือ ลักษณะของรูปทรงที่ได้แรงบันดาลใจมาจากรูปทรงของธรรมชาติ หรือการเลียนแบบธรรมชาติ ลักษณะรูปทรงมีความโค้งมน (Inpuntung et al., 2020, p. 225) หรืออาจมีระบบโครงสร้างที่อ้างอิงจากลักษณะของธรรมชาติ ซึ่งแสดงคุณสมบัติทางสุนทรียะที่น่าสนใจ โดยไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามสัญชาตญาณ ส่วนรูปทรงอิสระ (freeform) คือ ลักษณะของรูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอ ไม่ใช่เรขาคณิตที่สมบูรณ์ ถูกพัฒนาขึ้นโดยการเปลี่ยนรูปเรขาคณิตดั้งเดิม ไม่ว่าจะเป็นการรวมกัน การปรับลดขนาด การลดทอน การบิด การหมุน (Nurdiah, 2016, p. 32) มีความแตกต่างจากรูปทรงอินทรีย์ในแง่มุมมองของแนวคิดที่ไม่ได้ยึดโยงกับการอ้างอิงหรือเลียนแบบรูปทรงธรรมชาติ

3.3.4 ลักษณะรูปทรงโครงสร้าง ในงานสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัย

ลักษณะรูปทรงโครงสร้างในงานสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัย สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท ดังนี้ (1) Skeleton structure คือ โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนหลายชิ้นมาประกอบกัน ใช้วิธีการถ่ายแรงจากชิ้นส่วนหนึ่งไปสู่อีกชิ้นส่วนหนึ่ง ส่วนใหญ่รับแรงดัด โดยนำลำไผ่มาประกอบเป็นโครงถักรูปร่างต่าง ๆ เช่น Bamboo Pratt Truss, Bamboo Howe Truss, Bamboo plane truss, Bamboo space truss เป็นต้น หรือมีลักษณะเป็นโครงเฟรม (frame structure) เช่น Bamboo portal frame, Bamboo half portal frame (2) Surface structure คือ โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นผืน มีลักษณะการถ่ายแรงแบบกระจายไปทุกส่วนของผืนโครงสร้างนั้น ๆ เช่น Bamboo Hyperbolic paraboloid (Kumsingsree & Rittironk, 2020, pp. 71-77)

3.4 ประเภทการก่อรูปทรงโครงสร้าง (Structure forming) และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง (Structural configuration)

การศึกษาประเด็นการแบ่งประเภทการก่อรูปทรงโครงสร้างและการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจการก่อรูปทรงของโครงสร้าง ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นมาประกอบกัน สามารถแบ่งลักษณะการก่อรูปทรงของโครงสร้างได้ 2 แบบ ดังนี้ (Schodek & Bechthold, 2014, p. 4)

- (1) การก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น (Line-forming elements) เป็นการก่อรูปทรงโครงสร้างจากวัสดุที่มีลักษณะเชิงเส้น สามารถเกิดขึ้นได้จากการประกอบกันของวัสดุที่มีความเป็นเส้นตรง หรือวัสดุที่มีความเป็นเส้นโค้ง
- (2) การก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงแผ่นผืน (Surface forming elements) เป็นการก่อรูปทรงโครงสร้างจากวัสดุที่มีลักษณะเชิงแผ่นผืน ทั้งแผ่นผืนที่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือแผ่นผืนขนาดเล็กมาประกอบกัน

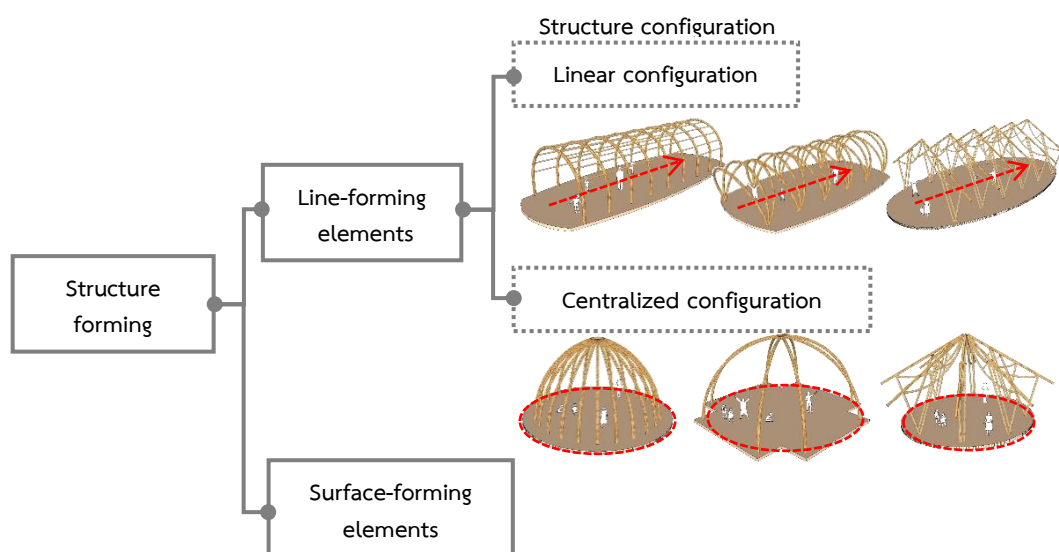
โดยการก่อรูปทรงโครงสร้างทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุ และเทคนิคในการก่อสร้าง เช่น วัสดุประเภทไม้ มีลักษณะความเป็นท่อน ตามธรรมชาติสามารถขึ้นรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น ในชั้นส่วนประเภทเสา ซึ่งสามารถรับแรงอัดได้ดี ในกรณีที่ถูกรูปเป็นแผ่นไม้อัด (Plywood) จะสามารถขึ้นรูปทรงแบบองค์ประกอบเชิงแผ่นผืนได้ เล็กน้อย หรือสามารถเป็นโครงสร้างแผ่นผืนขนาดใหญ่เมื่อนำไม้อัดหลายแผ่นมาประกอบกัน ในขณะที่วัสดุประเภท คอนกรีต สามารถขึ้นรูปทรงได้ทั้งสองแบบ เนื่องจากธรรมชาติของวัสดุใช้วิธีการก่อสร้างแบบเทและหล่อตามแม่พิมพ์ ส่วนวัสดุประเภท เหล็ก สามารถขึ้นรูปทรงโครงสร้างแบบองค์ประกอบเชิงเส้นได้ดี ในขณะเดียวกันสามารถขึ้นรูปทรงโครงสร้างแบบ องค์ประกอบเชิงแผ่นผืนได้เล็กน้อย

เมื่อพิจารณาการแบ่งประเภทการก่อรูปทรงตามที่ Schodek and Bechthold (2014) ในทำนองเดียวกันหากใช้ งานไม้ บนพื้นฐานคุณลักษณะทางกายภาพเป็นลำยาว มีข้อ มีปล้อง สามารถก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น จากรูปร่างโครงสร้างที่หลากหลาย เช่น โครงถักไผ่ในรูปร่างต่าง ๆ (Bamboo truss) ลักษณะดังกล่าวจัดอยู่ในรูปทรง โครงสร้างแบบชิ้นส่วนประกอบ (Skeleton structure) เช่น อาคาร Everland restaurant ประเทศเวียดนาม และในกรณีที่ นำไม้มาใช้งานในลักษณะผ่าซีกตามแนวยาวของลำ จะสามารถขึ้นรูปทรงแบบองค์ประกอบเชิงแผ่นผืนได้เช่นกัน การใช้งานใน ลักษณะดังกล่าวจัดอยู่ในรูปทรงโครงสร้างแบบแผ่นผืน (Surface structure) เช่น อาคาร Tulum Temple ประเทศเม็กซิโก เป็นต้น

ทั้งนี้การขึ้นรูปของโครงสร้างจะเกิดขึ้นไม่ได้ หากปราศจากการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่ง Maurina & Prastyatama (2017) ได้ขยายความในประเด็นการนำวัสดุไม้มาขึ้นรูปโครงสร้างอาคารแบบองค์ประกอบเชิงเส้น (Line-forming elements) เนื่องจากไม้มีคุณลักษณะทางกายภาพของวัสดุเป็นท่อนเช่นเดียวกับไม้ โดยการการจัดเรียงชิ้นส่วน โครงสร้างเชิงเส้น สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ ดังนี้

(1) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง (Linear configuration) เป็นการนำองค์ประกอบเชิงเส้นของแต่ละ ชิ้นโครงสร้าง มาจัดวางเรียงกันไปตามลำดับในแนวเส้นตรง และจากแนวเส้นตรงสามารถพัฒนาเป็นแนวเส้นโค้งได้ เช่นเดียวกัน ซึ่งก่อให้เกิดการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นโค้ง (Curve configuration)

(2) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวรัศมีหรือรวมศูนย์ (Centralized configuration) เป็นการนำองค์ประกอบเชิง เส้นของแต่ละชิ้นโครงสร้าง มาจัดวางเรียงกันในแนวรัศมีวงกลม หรือจัดเรียงให้เกิดการรวมกันเข้าสู่จุดศูนย์กลาง (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ประเภทการก่อรูปทรงโครงสร้างและการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง

Figure 3 Type of structure forming and Structural configuration

3.5 การพิจารณาแรงในโครงสร้าง

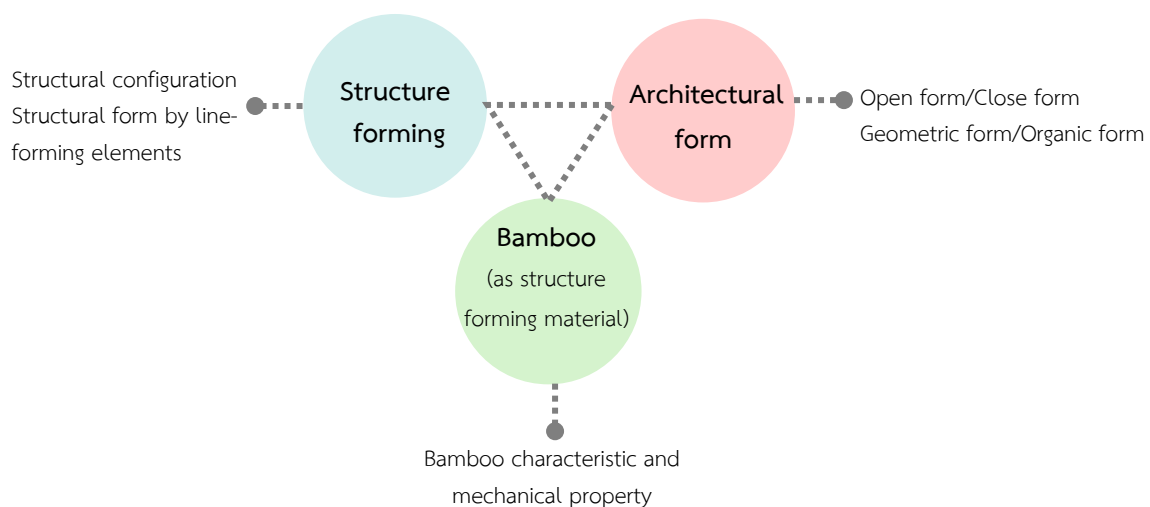
การพิจารณาแรงในโครงสร้างทำให้ทราบถึงลักษณะพฤติกรรมของโครงสร้าง โดย Sandaker (2008) แบ่งระดับการพิจารณาโครงสร้างตามพฤติกรรมการรับแรง 2 ระดับ คือ 1) ระดับใหญ่ (Global form) คือการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในระดับภาพใหญ่ หรือลักษณะโดยรวมของระบบโครงสร้างทั้งหมด 2) ระดับย่อย (Local form) คือการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในระดับตำแหน่งเฉพาะจุดที่วัสดุหรือชิ้นส่วนนั้น ๆ มาประกอบกันในแต่ละข้อต่อ (joint) หรือฐานรองรับแรง (support) การแบ่งระดับนี้สามารถใช้เป็นกรอบการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในโครงสร้างของอาคารทั่วไปรวมถึงสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัย ดังนี้

-ระดับ Global form มีวัตถุประสงค์เพื่อ พิจารณาแผนภาพแรงในโครงสร้างสถาปัตยกรรมไม้ ว่ามีความสัมพันธ์กับและรูปทรงสถาปัตยกรรมอย่างไร

-ระดับ Local form มีวัตถุประสงค์เพื่อ พิจารณาแรงกระทำในตำแหน่งย่อยในฐานรองรับแรง (support) บริเวณที่ขึ้นส่วนโครงสร้างเหนือดินเชื่อมต่อกับฐานรากอาคาร ว่ามีลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณลำไผ่ที่ใช้ในการก่อสร้างอย่างไร ถือเป็นข้อดีที่จะนำไปสู่การลดการสারণไฟที่เกินกว่าโครงสร้างอาคารต้องการ รวมถึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อไฟที่เกินความจำเป็น

โดยทั้งสองระดับวิเคราะห์ผ่านแผนภาพโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram) ตามหลักการของ Pier Luigi Nervi ในการออกแบบรูปทรงโครงสร้างให้สอดคล้องกับแผนภาพโมเมนต์ดัด ซึ่งจะทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพมากที่สุด (Kumsingsree et al., 2024, p. 220)

จากการทบทวนแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปเป็นกรอบแนวคิดเพื่อตอบคำถามของบทความในประเด็นที่ว่า ความสัมพันธ์ของรูปทรงสถาปัตยกรรม และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ในงานสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัยมีลักษณะเป็นอย่างไร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กรอบแนวคิดในการศึกษา
Figure 4 Conceptual framework

4. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research) โดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed-Methods study) ระหว่างการสำรวจกายภาพสถาปัตยกรรม การสัมภาษณ์บุคคล และการจำลองพฤติกรรมการรับแรงในโครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล (Method of data collection) ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล 2 ส่วน ได้แก่

- 1) การเก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ

- การสังเกตโดยตรง (Direct-Observation) เป็นการลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลกายภาพสถาปัตยกรรม ที่เป็นอาคารกรณีศึกษา โดยการสังเกต รั้ววัด และบันทึกกายภาพสถาปัตยกรรม ด้วยอุปกรณ์เครื่องวัดระยะดิจิทัล ตลับเมตร อุปกรณ์จัดบันทึก อุปกรณ์บันทึกภาพนิ่ง และภาพเคลื่อนไหว

- การสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้าง (Structured interview) เป็นการนำข้อคำถามในประเด็นต่าง ๆ ไปสัมภาษณ์บุคคล เช่น สถาปนิก วิศวกร เจ้าของบริษัท เจ้าของอาคาร เป็นต้น โดยกระบวนการขออนุญาตเข้าสำรวจสถาปัตยกรรมและสัมภาษณ์บุคคลนั้น ผู้ศึกษาได้ปฏิบัติตามหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ และผ่านการพิจารณาการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์แบบ Exemption review รหัสโครงการ คือ SSR65/201 และ COE No.65/157 ดังนั้นเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าว การศึกษานี้จึงได้ใช้นามแฝง (pseudonym) แทนการระบุตัวตน ใน 3 ส่วน ดังนี้ (1) ชื่ออาคารกรณีศึกษา (2) ชื่อบุคคลผู้ให้สัมภาษณ์ (3) ชื่อบริษัทผู้ออกแบบและผู้ก่อสร้าง

2) การเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ

การเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิเป็นไปเพื่อสนับสนุนการทำความเข้าใจอาคารกรณีศึกษาอย่างรอบด้าน เช่น ประวัติความเป็นมา ช่วงเวลา ภาพเหตุการณ์ ภาพการก่อสร้าง ภาพถ่ายทางอากาศ แผนที่ตั้งอาคาร โดยศึกษาผ่านหนังสือ บทความ สื่อออนไลน์ นิตยสาร เป็นต้น

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล (Data analysis and discussion) ใช้หลักการการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์เนื้อหา (Content analysis) ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์บุคคล
- 2) การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างกรณีศึกษา (Cross-case comparative analysis) และการแยกประเภท (Classification) ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจกายภาพสถาปัตยกรรม อันได้แก่ ลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรม ลักษณะการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ลักษณะรูปทรงโครงสร้าง เป็นต้น

- 3) การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมศาสตร์ ใช้วิเคราะห์ข้อมูลทางโครงสร้าง เป็นการจำลองพฤติกรรมการรับแรง (simulation) โดยประมวลผลแรงกระทำต่อวัสดุชิ้นส่วนโครงสร้างรูปแบบการจำลองโครงสร้างเชิงเส้น (Line element) หรือที่เรียกว่า แบบจำลองพื้นฐานอย่างง่าย (Simplified analysis model) ด้วยโปรแกรม SAPP 2000 Educational version ซึ่งเหมาะสำหรับโครงสร้างอาคารที่มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนประกอบกัน หรือที่เรียกว่า Skeleton structure สอดคล้องกับโครงสร้างของอาคารกรณีศึกษา ที่มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนแบบโครงถักและแบบโครงเฟรม รวมถึงสามารถแสดงผลการจำลองพฤติกรรมการรับแรงออกมาเป็นแผนภาพ ซึ่งนำไปสู่การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกายภาพของโครงสร้างอาคารได้ นอกจากนี้ โปรแกรม SAPP 2000 ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้สอดคล้องกับมาตรฐานและข้อกำหนดการออกแบบโครงสร้าง โดยเฉพาะข้อกำหนดการออกแบบโครงสร้างของ American Concrete Institute (ACI) ที่ประเทศต่าง ๆ ใช้อ้างอิง รวมถึงในประเทศไทย เช่น หน่วยงานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) เป็นต้น (Chapirom, 2021, p. 5)

4.3 การพิจารณาตัวแทนอาคารกรณีศึกษา (Selection of case-study approach) จากคำอธิบายของ Robert Yin (2018) ได้กล่าวถึงการใช้กรณีศึกษา หรือ “Case studies” ไว้ว่า เป็นระเบียบวิธีวิจัยประเภทหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบและพิสูจน์ทราบข้อคำถาม หรือประเด็นที่ต้องการหาคำตอบ โดยใช้การศึกษาผ่านอาคารกรณีศึกษาหลายแห่ง (Multi-case study) ซึ่งนำมาสู่การสำรวจสถาปัตยกรรมพร้อมสมัยที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ เป็นอาคารสาธารณะ และมีข้อมูลปรากฏในสื่อออนไลน์ ทำการสืบค้นเมื่อเดือนมกราคม พ.ศ. 2564 จำนวน 32 อาคาร จากนั้นจึงใช้ข้อพิจารณาในการคัดเลือกตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ดังนี้

- 1) ลักษณะการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง มีการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างหลากหลาย เช่น การจัดเรียงชิ้นส่วนแบบเส้นตรง การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเส้นโค้ง และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบรวมศูนย์

- 2) ลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรม เป็นอาคารที่มีรูปทรงสถาปัตยกรรมแบบเรขาคณิต และแบบอินทรีย์ โดยรูปทรงอินทรีย์นั้น ตามที่ Nurdiah (2016, pp. 30-38) เสนอไว้ว่าเป็นอีกแง่มุมหนึ่งที่ทำให้เห็นถึงขีดความสามารถการใช้งานได้ในฐานะวัสดุก่อสร้างสถาปัตยกรรม

- 3) ลักษณะโครงสร้างที่แสดงถึงศักยภาพในการรับแรงกระทำ มีระยะช่วงพาดเสามากกว่า 4.00 เมตร ซึ่งเป็นการลดข้อจำกัดการใช้งานวัสดุได้ในอาคารช่วงพาดสั้น

- 4) ประเภทการใช้งานอาคาร ได้แก่ อาคารที่เกี่ยวข้องกับภาคบริการด้านอาหารและเครื่องดื่ม และอาคารที่เกี่ยวข้องกับภาคการศึกษา เนื่องจากการสำรวจ พบว่า มีสัดส่วนมากกว่าอาคารประเภทอื่น ๆ

จากข้อพิจารณาดังกล่าว นำไปสู่การสรุปอาคารกรณีศึกษา 4 อาคาร ได้แก่ (1) Sport Hall in School จ.เชียงใหม่ (2) Thai Cooking School จ.เชียงใหม่ (3) Central Restaurant จ.กรุงเทพฯ (4) South Restaurant จ.กระบี่ ส่วนรายละเอียดการสำรวจกายภาพสถาปัตยกรรมของแต่ละอาคารจะกล่าวถึงลำดับถัดไป

5. การสำรวจกายภาพสถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัย ที่เป็นอาคารกรณีศึกษา

การนำเสนอในหัวข้อนี้เป็นไปเพื่อสร้างความเข้าใจต่อลักษณะกายภาพสถาปัตยกรรมของอาคารกรณีศึกษาที่ปรากฏ ซึ่งเป็นข้อมูลปฐมภูมิ ที่ได้จากการสังเกต รั้ววัด และบันทึกกายภาพสถาปัตยกรรม ใช้สำหรับการวิเคราะห์การก่อรูปโครงสร้างจากชิ้นส่วนประกอบเชิงเส้น รูปทรงสถาปัตยกรรม และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยทำการศึกษาผ่านการวิเคราะห์ผังพื้น รูปด้าน รูปตัด การรับแรงในโครงสร้าง มีรายละเอียดดังนี้

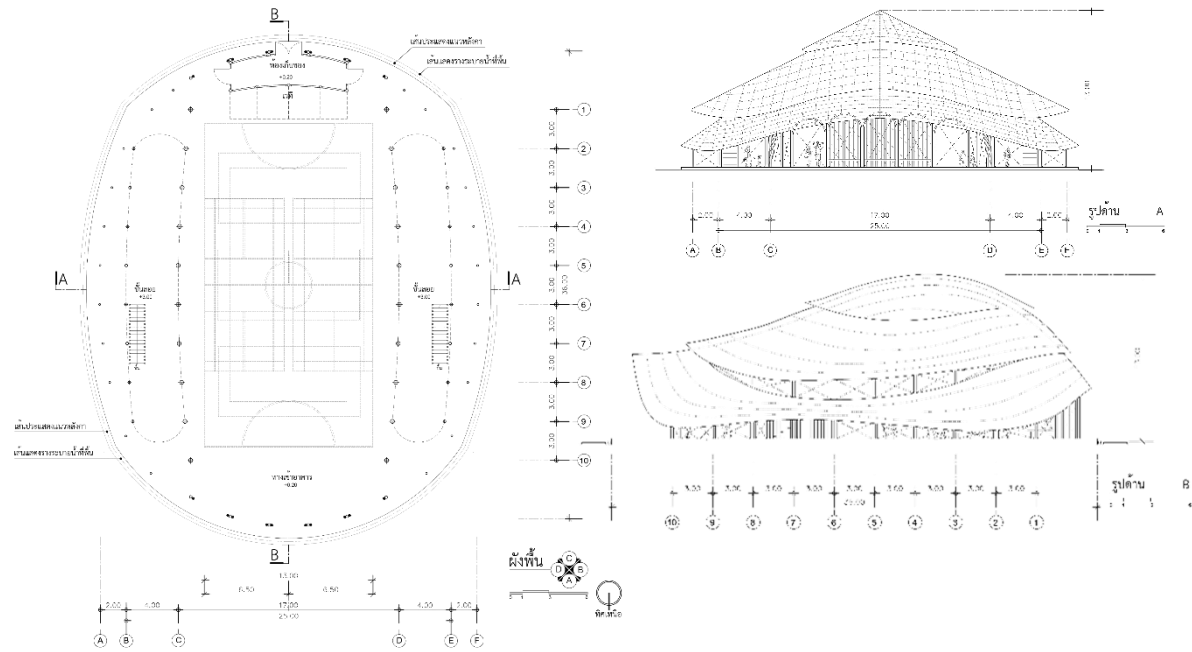
5.1 อาคาร Sport Hall in School

• การใช้งานพื้นที่และขนาดอาคาร อาคาร Sport Hall in School มีการใช้งานพื้นที่หลักเป็นสนามกีฬาในร่ม ได้แก่ ฟุตซอล บาสเก็ตบอล มินิโวลเลย์บอล แบดมินตัน รวมถึงเป็นพื้นที่เอนกประสงค์สำหรับการจัดประชุม หรือกิจกรรมต่าง ๆ ทำให้พื้นที่ดังกล่าวมีการใช้งานที่ยืดหยุ่น ลักษณะของพื้นที่การใช้งานหลักเป็นแบบเปิดโล่งตลอดแนวอาคาร และมีพื้นที่ปิดล้อมในส่วนของห้องเก็บของหลังเวที ขนาดอาคารมีความกว้าง 25 เมตร ความยาว 36 เมตร ความสูง 13.00 เมตร พื้นที่ใช้สอย 782 ตารางเมตร สามารถบรรจุผู้ใช้งานอาคารได้ ประมาณ 300 คน เป็นอาคารที่มีขนาดใหญ่ที่สุดใน 4 อาคาร มีการวางอาคารด้านยาวในแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยด้านการลดแสงรบกวนสายตาขณะใช้งานสนามกีฬา (รูปที่ 5)

• ลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรม มีลักษณะรูปทรงอินทรีย์ ที่มีที่ว่างภายในเชื่อมโยงกับที่ว่างภายนอก และที่ว่างบางส่วนถูกปิดล้อมด้วยระบบผนัง ในตำแหน่งที่เป็นห้องเก็บของ จากการสัมภาษณ์สถาปนิก พบว่า การออกแบบรูปทรงทางสถาปัตยกรรมได้เชื่อมโยงกับภาพตัวแทนของ ดอกบัว อันเป็นดอกไม้ประจำพุทธศาสนา และการประยุกต์ใช้หลักธรรมเข้ากับหลักสูตรการเรียนการสอน ตามแนวทางของโรงเรียนวิสุทธิบุตร ดังนั้นเส้นโค้งของดอกบัวตูม จึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบรูปทรงและที่ว่างของอาคาร ร่วมกับเส้นความโค้งของสันเขาที่สื่อสารถึงบริบทสภาพแวดล้อมและความเป็นธรรมชาติ มีการซ้อนชั้นหลังคาเช่นเดียวกับการซ้อนกันของกลีบดอกบัว โดยด้านหน้าอาคารใช้เส้นโค้งเข้ชันเล็กน้อยเพื่อบอกถึงการเปิดที่ว่างเหนือศีรษะ ซึ่งเป็นทางเข้าอาคาร และสร้างความอ่อนช้อยด้วยเส้นโค้งที่ยาวต่อเนื่องไปยังปลายสุดของอาคาร

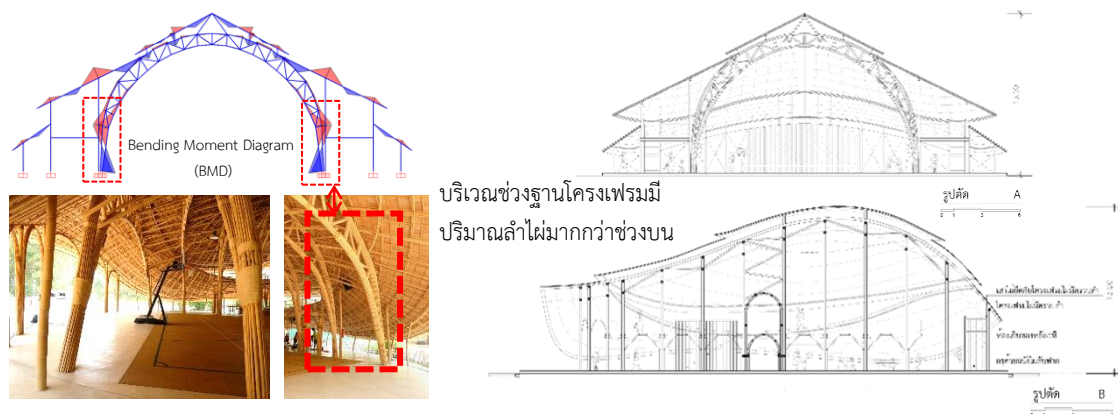
• การก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น เป็นการนำลำไผ่มาประกอบกันให้เกิดเป็นชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยชิ้นส่วนโครงสร้างของอาคาร มีลักษณะรูปทรงโครงสร้างหลักที่ผสมผสานระหว่างโครงถักและโครงเฟรมโค้งเข้าด้วยกัน (Bamboo bundle arch truss frames) ชิ้นส่วนโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการนำไผ่รวกดำไปตัดโค้ง จากนั้นใช้เทคนิคการมัดรวกลำไผ่ (bamboo bundle) แล้วรัดรอบด้วยเข็มขัดรัดทอสแตนเลส ทำให้เกิดเป็นโครงเฟรมโค้งที่ยาวต่อเนื่อง รวมถึงเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีขนาดหน้าตัดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณเนื้อวัสดุในการรับโมเมนต์ดัด (bending moment) โดยเฉพาะบริเวณที่ฐานโครงเฟรมจะรับโมเมนต์ดัดในปริมาณที่มากกว่าช่วงบนของโครงเฟรม ดังแสดงในแผนภาพโมเมนต์ดัด (bending moment diagram) (รูปที่ 6) จากนั้นเสริมความแข็งแรงของโครงเฟรมด้วยการเพิ่มระยะความลึก (depth) ประมาณ 1.2 เมตร ด้วยวิธีการใช้ลำไผ่ประกอบกันเป็นรูปร่างสามเหลี่ยมที่มีชื่อเรียกว่า Warren with vertical truss โดยเพิ่มตัวยึดในแนวตั้ง (Vertical Web) ด้วยไผ่ซางหม่น และตัวยึดในแนวทะแยง (Diagonal Web) ด้วยไผ่สีสุก ถือเป็นการเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนในการรับแรงตามแนวแกน ลักษณะดังกล่าวนี้เป็นการผสมระหว่างโครงเฟรมโค้งที่เกิดจากไผ่มัดรวกลำ เข้ากับระบบสามเหลี่ยมของโครงถัก ซึ่งทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

• การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นถูกจัดเรียงในแนวเส้นตรง (linear configuration) ดังรูปที่ 7 โดยแต่ละโครงเฟรมมีระยะช่วงพาด (span) 17.00 เมตร และระยะห่างด้านข้าง (bay) 3.00 เมตร จัดวางไล่ลำดับตั้งแต่ว่าทางเข้าอาคารไปถึงปลายอาคารอีกด้านหนึ่ง เรียงต่อเนื่องกันจำนวน 10 โครงเฟรม โดยบริเวณด้านล่างสุดของโครงเฟรมแต่ละตัว ยึดกับฐานรากอาคารแบบยึดแน่นไม่เคลื่อนที่ หรือที่เรียกว่า fixed support ทำให้ตำแหน่งช่วงฐานของโครงเฟรม มีโมเมนต์ดัด (Bending moment) เกิดขึ้นบริเวณฐานมากที่สุด จึงมีการเสริมลำไผ่เข้าไปหลายลำ เพื่อเพิ่มปริมาณและความหนาของเนื้อวัสดุที่จะรับโมเมนต์ดัด ดังได้กล่าวไปแล้วนั้น ทำให้ความหนาของโครงเฟรมบริเวณช่วงฐานมากกว่าตำแหน่งอื่น ขณะที่โมเมนต์ดัดจะลดน้อยลงในช่วงบนของโครงเฟรม ส่งผลให้ปริมาณลำไผ่ด้านบนน้อยกว่าช่วงล่างของฐานโครงเฟรม ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะกายภาพสถาปัตยกรรมที่ปรากฏ



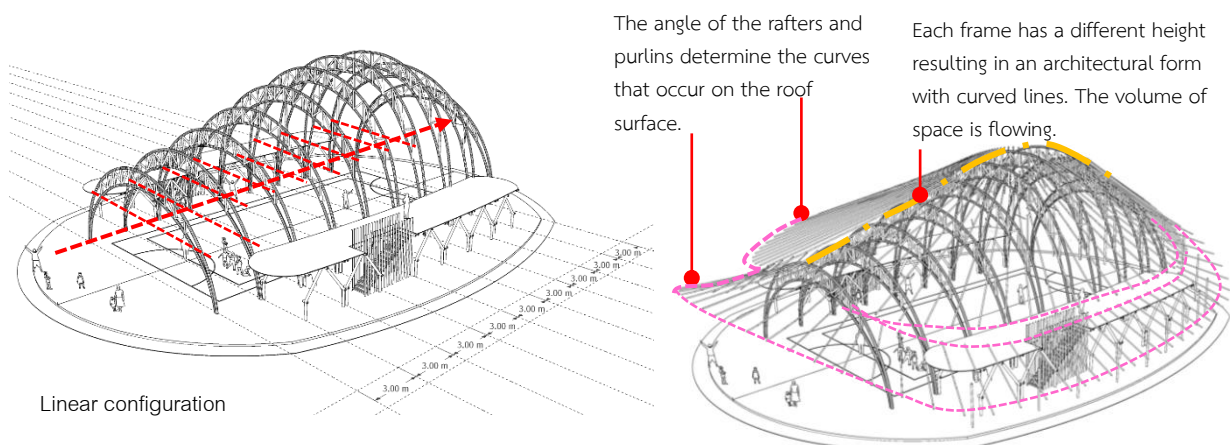
รูปที่ 5 ผังพื้นและรูปด้านอาคาร Sport Hall in School

Figure 5 Floor plan and elevation of Sport Hall in School



รูปที่ 6 แผนภาพโมเมนต์ดัดและรูปตัดอาคาร Sport Hall in School

Figure 6 Bending Moment Diagram of Sport Hall in School



รูปที่ 7 การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเส้นตรงของอาคาร Sport Hall in School

Figure 7 Linear configuration in Sport Hall in School

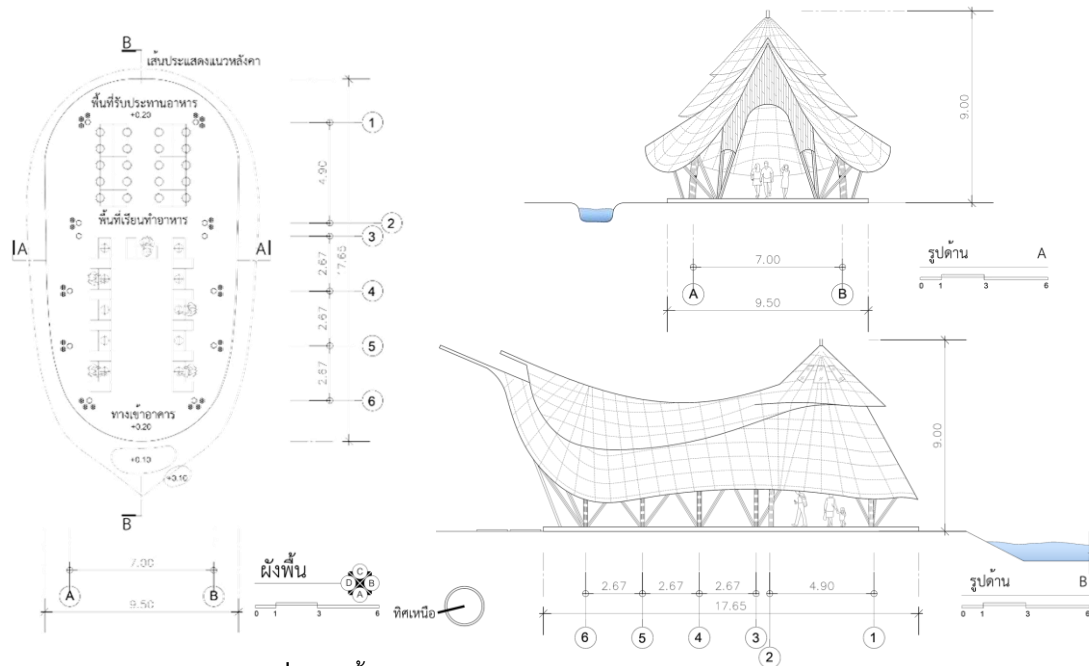
5.2 อาคาร Thai Cooking School

• การใช้งานพื้นที่และขนาดอาคาร อาคาร Thai Cooking School เป็นโรงเรียนสอนทำอาหารไทยให้กับชาวต่างชาติ มีการใช้งานพื้นที่ซึ่งประกอบไปด้วย (1) พื้นที่สอนทำอาหาร (2) พื้นที่เตรียมอาหาร (3) พื้นที่นั่งรับประทานอาหาร ลักษณะของพื้นที่หลักเป็นแบบเปิดโล่งตลอดแนวอาคาร ไม่มีพื้นที่ปิดล้อม ขนาดอาคารมีความกว้าง 9.44 เมตร ความยาว 17.34 เมตร ความสูง 9.00 เมตร พื้นที่ใช้สอย 145 ตารางเมตร เป็นอาคารหลักซึ่งทำจากวัสดุไม้ และมีอาคารประกอบอื่น ๆ เช่น ครั้วไทย ร้านของที่ระลึก บ้านพักอาศัยของเจ้าของร้าน ห้องน้ำ เป็นต้น มีการวางอาคารด้านยาวในแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก มีข้อดีคือ ทำให้ด้านกว้างของอาคารโดนแดดน้อยกว่าด้านยาว ส่วนข้อด้อยคือ ด้านหน้าอาคารหันไปยังทิศตะวันตก ส่งผลให้วัสดุไม้ที่อยู่ด้านนี้มีสีที่อ่อนลงมากกว่าด้านเอียง ส่วนกิจกรรมของโรงเรียน คือ การสอนทำอาหารไทยแบบเป็นกลุ่ม กลุ่มละ 8-10 คน สามารถบรรจุผู้ใช้งานอาคารได้ 80-90 คน (รูปที่ 8)

• ลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรม มีลักษณะเป็นรูปทรงอินทรี ที่มีที่ว่างภายในเชื่อมโยงกับภายนอก ไม่มีการปิดกั้นด้วยระบบผนัง จากการสัมภาษณ์เจ้าของอาคาร พบว่า มีความชื่นชอบในงานสถาปัตยกรรมที่ใช้ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างและวัฒนธรรมพื้นเมือง รวมถึงมีความเชื่อที่เกี่ยวข้องกับความเป็นสิริมงคลและความร่มเย็น ในขณะเดียวกันยังต้องการใช้งานพื้นที่แบบเปิดโล่ง ซึ่งสามารถระบายกลิ่น คิวไฟ และเชื่อมต่อไปยังสวนผักอินทรีย์ ภายใต้แนวคิด Cooking in Organic farm อันเป็นแนวคิดของโรงเรียนในการสร้างความแตกต่างจากโรงเรียนสอนทำอาหารไทยอื่น ๆ ผ่านการเรียนรู้ในสถาปัตยกรรมไม้ที่อ่อนช้อย สวยงาม และน่าประทับใจ ดังนั้นลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรมจึงเกิดจากการผสมผสานใน 3 ส่วน คือ (1) ส่วนที่มาจากเจ้าของอาคารในแนวความคิด ไม้โพธิ์ อันเป็นภาพตัวแทนของความเป็นสิริมงคลและความร่มเย็น โดยภายในอาคารมีการประดับด้วยโคมไฟรูปไม้โพธิ์เพื่อให้เกิดความสอดคล้องกัน (2) ส่วนที่มาจากสถาปนิกในแนวความคิด เรือนกาแล ลักษณะเข็ดหน้าจั่วให้สูงขึ้น เพื่อแสดงถึงการต้อนรับ การเชื้อเชิญแขกผู้มาเยือนจากนานาประเทศ (3) ส่วนที่มาจากประโยชน์ใช้สอยโดยตรงของอาคาร คือ การการระบายกลิ่นและคิวไฟในระหว่างที่ประกอบอาหารพร้อมกันหลายเตา จึงทำให้เกิดการออกแบบหลังคาซ้อนชั้น ประเด็นนี้จึงเป็นข้อพิจารณาสำคัญ ที่นำไปสู่การเปิดช่องระบายอากาศบนหลังคา ด้วยการซ้อนชั้นของหลังคา รวมถึงการพิจารณาถึงลักษณะของรูปทรงโครงสร้างที่ส่งผลต่อปริมาตรที่ว่างในแนวตั้งให้มีความสูงด้วยเช่นกัน

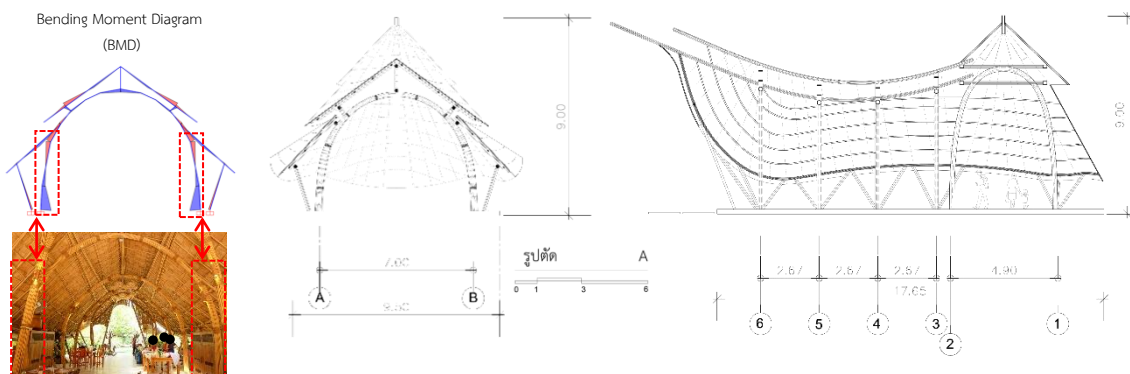
• การก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น โดยขึ้นส่วนโครงสร้างของอาคาร Thai Cooking School มีลักษณะรูปทรงโครงสร้างหลักเป็นโครงเฟรมโค้ง (Bamboo bundle arch frames) ที่เกิดจากการมัดรวบลำไผ่รวกดำหลายลำเข้าด้วยกัน ซึ่งคล้ายกับโครงเฟรมของอาคาร Sport Hall in School แม้ว่าโครงเฟรมโค้งของอาคาร Thai Cooking School จะไม่มีระยะความลึกของโครงเฟรม อย่างไรก็ตามการมัดไผ่หลายลำเข้าด้วยกันจนเกิดเป็นความหนาของโครงสร้างหลักนั้นสามารถลดการโก่งหรือแอ่นของชิ้นส่วนโครงสร้างได้

• การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง พบลักษณะการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นแบบผสมผสาน จาก 2 รูปแบบ คือ (1) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง (Linear configuration) โดยไล่ลำดับเข้าไปจนถึงด้านในสุดของอาคาร แต่ละโครงเฟรมมีระดับความสูงไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลให้ปริมาตรของที่ว่างมีความลื่นไหลต่อเนื่องกันไป โครงเฟรมในแนวเส้นตรงนี้มีการวางระยะห่างแต่ละโครงอยู่ที่ 2.60 เมตร เรียงต่อเนื่องกันไปจำนวน 4 โครงเฟรม (2) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวรัศมีหรือรวมศูนย์ (Centralized configuration) เกิดขึ้นบริเวณด้านในสุดของอาคาร ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยหลังคาทรงกรวยคว่ำ (Conical roof) มีระยะห่างของโครงเฟรมอยู่ที่ 4.90 เมตร จำนวน 2 โครงเฟรม (รูปที่ 10) โดยบริเวณด้านล่างสุดของแต่ละโครงเฟรมทั้งสองข้าง ถ้ายางผ่านฐานรองรับแบบยึดแน่นไม่เคลื่อนที่ (fixed support) ทำให้มีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นมากในตำแหน่งด้านล่างสุดของโครงเฟรม เช่นเดียวกับโครงเฟรมของอาคาร Sport Hall in School ที่มีเนื้อวัสดุหรือการเสริมปริมาณลำไผ่ช่วงฐานล่างของโครงเฟรมมากกว่าด้านบนโครงเฟรม ดังแสดงในแผนภาพโมเมนต์ดัด (รูปที่ 9) ขณะเดียวกันยังพบข้อสังเกตในผังพื้นและรูปด้านหน้าอาคารมีลักษณะสมดุลแบบสมมาตร (Symmetrical balance) ทำให้ปริมาตรที่ว่างที่เกิดขึ้นในรูปตัดขวางเท่ากัน ในขณะที่การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบรวมศูนย์นั้น ไม่สามารถสังเกตได้จากผังพื้น แต่สามารถมองเห็นและรับรู้ได้จากระบบโครงสร้างเมื่อเข้าไปใช้งานอาคาร ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างของอาคารหลังนี้ มีลักษณะเป็นแบบผสมผสาน ระหว่างการจัดเรียงในแนวเส้นตรง ร่วมกับการจัดเรียงในแนวรัศมี ทำให้ปริมาตรที่ว่างมีการเปลี่ยนแปลงจากที่ว่างที่มีความต่อเนื่องในแนวเส้นตรง สู่ปริมาตรที่ว่างแบบรวมศูนย์ ซึ่งเน้นย้ำให้เห็นถึงความสำคัญของที่ว่างภายใต้ระบบโครงสร้างหลักและหลังคาทรงกรวยคว่ำ



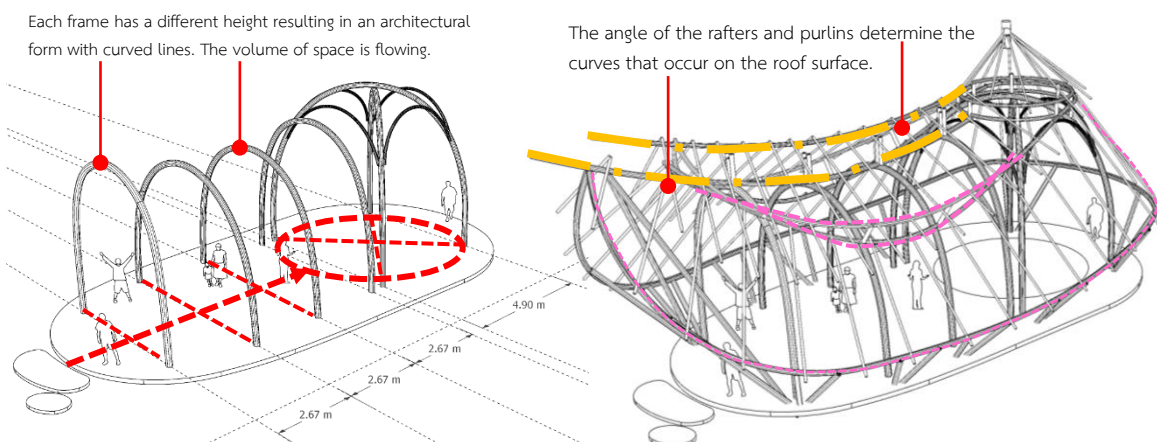
รูปที่ 8 ผังพื้นและรูปด้านอาคาร Thai Cooking School

Figure 8 Floor plan and elevation of Thai Cooking School



รูปที่ 9 แผนภาพโมเมนต์ดัดและรูปตัดอาคาร Thai Cooking School

Figure 9 Bending Moment Diagram of Thai Cooking School



รูปที่ 10 การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบผสมผสาน ระหว่างแนวเส้นตรงกับแนวรัศมีของอาคาร Thai Cooking School

Figure 10 Mixed-configuration between linear and centralized configuration in Thai Cooking School

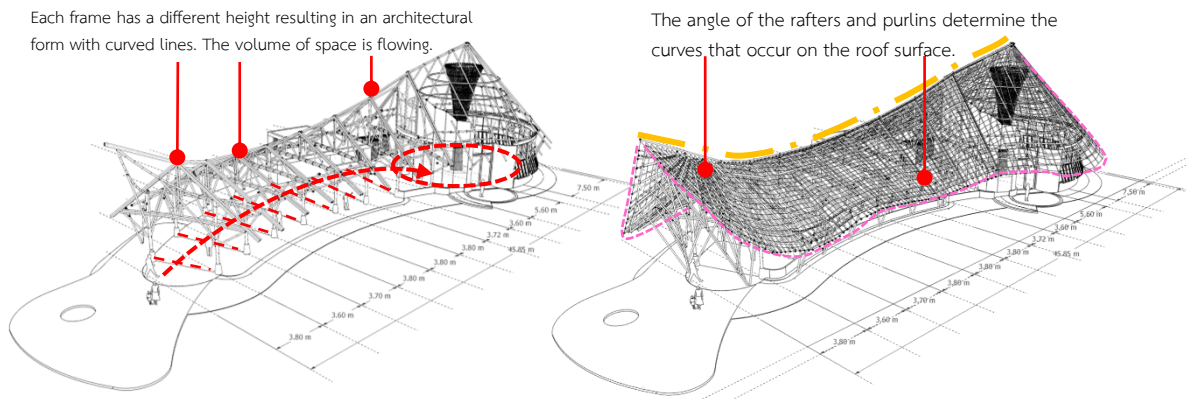
5.3 อาคาร Central Restaurant

• การใช้งานพื้นที่และขนาดอาคาร อาคาร Central Restaurant เป็นอาคารสาธารณะประเภทร้านอาหาร มีการใช้งานพื้นที่ซึ่งประกอบไปด้วย (1) พื้นที่เตรียมและประกอบอาหาร (2) จุดบริการลูกค้า (3) พื้นที่นั่งรับประทานอาหาร แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนพื้นที่ไม่ปรับอากาศ เป็นพื้นที่การใช้งานหลัก ซึ่งเปิดโล่งตลอดแนวอาคาร และส่วนพื้นที่ปรับอากาศ ซึ่งเป็นพื้นที่ปิดล้อม ขนาดอาคารมีความกว้าง 15 เมตร ความยาว 42 เมตร ความสูง 13.70 เมตร พื้นที่ใช้สอย 450 ตารางเมตร สามารถรองรับผู้ใช้งานอาคารได้ 170-200 คน มีการวางอาคารด้านยาวในแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก ด้านหน้าอาคารเป็นจัตุรัสสูงชัน และหันไปยังถนนหลัก ซึ่งเป็นมุมมองที่รับกับถนนโค้ง สร้างจุดเด่นให้เห็นได้ในระยะไกล (รูปที่ 12)

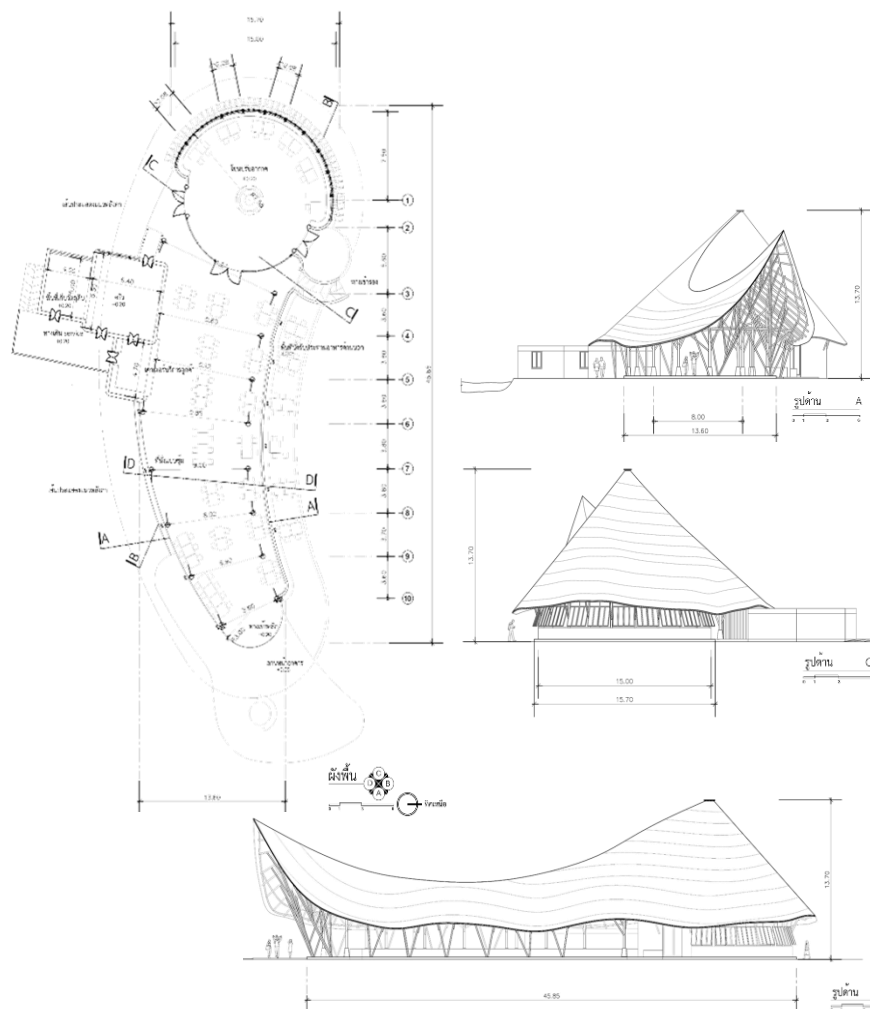
• ลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรม มีลักษณะเป็นรูปทรงอินทรีย์ มีที่ว่างภายในเชื่อมโยงกับที่ว่างภายนอก และที่ว่างบางส่วนถูกปิดล้อมด้วยระบบผนัง รูปทรงหลังคาเป็นแบบจั่วเข็มนาฬิกา ผสมกับหลังคาทรงกรวยคว่ำ บริเวณปลายสุดของอาคาร ซึ่งคล้ายกับอาคาร Thai Cooking School จากการสัมภาษณ์สถาปนิก พบว่า การออกแบบรูปทรงทางสถาปัตยกรรมได้เชื่อมโยงกับภาพตัวแทนของปลาน้ำจืด ซึ่งพบมากในเขตพื้นที่หนองจอก โดยความโค้งของเส้นรอบรูปตัวปลา นำมาประยุกต์ในผังพื้นที่อาคาร ให้เกิดความโค้งรับกับเส้นถนนด้านหน้าอาคาร ส่วนเส้นโค้งและความพลิ้วไหวของหลังคานั้นสื่อสารถึงความใกล้ชิดธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับสภาพที่ตั้ง และรายการอาหารที่มีการใช้ผักปลอดสารพิษจากสวนของทางร้าน นอกจากนี้ลักษณะเส้นสายอิสระ ยังสื่อสารถึงการพักผ่อน การสังสรรค์ ท่ามกลางบรรยากาศสภาพแวดล้อมที่ผ่อนคลายอีกด้วย

• การก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น โดยขึ้นส่วนโครงสร้างของอาคาร Central Restaurant เกิดจากรูปทรงโครงสร้างเชิงเส้นใน 2 ลักษณะ คือ (1) โครงถักสามเหลี่ยม เป็นโครงสร้างที่ครอบคลุมพื้นที่การใช้งานหลักของอาคาร ซึ่งเป็นพื้นที่เปิดโล่ง โดยใช้โครงถักที่เกิดจากการประกอบกันของลำไผ่ในรูปสามเหลี่ยมที่มีชื่อเรียกว่า Howe truss ประกอบด้วยดัดเอากับดัดโทที่รับแรงในแนวตั้ง และค้ำยันสำหรับกระจายแรงในแนวทะแยง (Diagonal Web) ใช้ไม้ตงประกอบเป็นชิ้นส่วนโครงถักร่วมกับการใช้เสาไม้จริง เป็นโครงสร้างเฟรมที่มีโมเมนต์มากที่ฐานของโครงเฟรม สอดคล้องกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสา โดยตำแหน่งโคนเสามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าปลายเสา ดังแสดงในแผนภาพโมเมนต์ดัด (รูปที่ 13) และโครงถักมีระยะช่วงพาด อยู่ระหว่าง 8.00-12.00 เมตร (2) โครงสร้างแบบเสาแกนกลาง (main core system) ตั้งอยู่ตรงกลางพื้นที่ด้านในสุด มีผังพื้นแบบวงกลม โดยเสาแกนกลาง เกิดจากการนำลำไผ่มาประกอบกัน หรือที่เรียกว่า เสาไผ่เกลียว (bamboo spiral lattice) และกระจายแรงออกสู่เสาไม้จริงที่จัดวางเป็นแนวรัศมีรอบผังพื้นวงกลม ข้อดีของการใช้เสาแกนกลางนี้ นอกจากเป็นโครงสร้างเสาหลักในการรับน้ำหนักแล้ว ยังส่งผลให้ปริมาตรที่ว่างในแนวตั้งมีความสูงโปร่งมากขึ้น รวมถึงด้านบนสุดของหลังคาสามารถนำแสงธรรมชาติเข้าสู่ตรงกลางอาคาร เพื่อลดความสลับของพื้นที่ได้ เป็นโครงสร้างที่ครอบคลุมโซนปรับอากาศ ขณะเดียวกันมีการใช้โครงสร้างย่อยที่เป็นกระจกใสสำหรับปิดล้อมที่ว่าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซึมผ่านของอากาศออกสู่ภายนอก

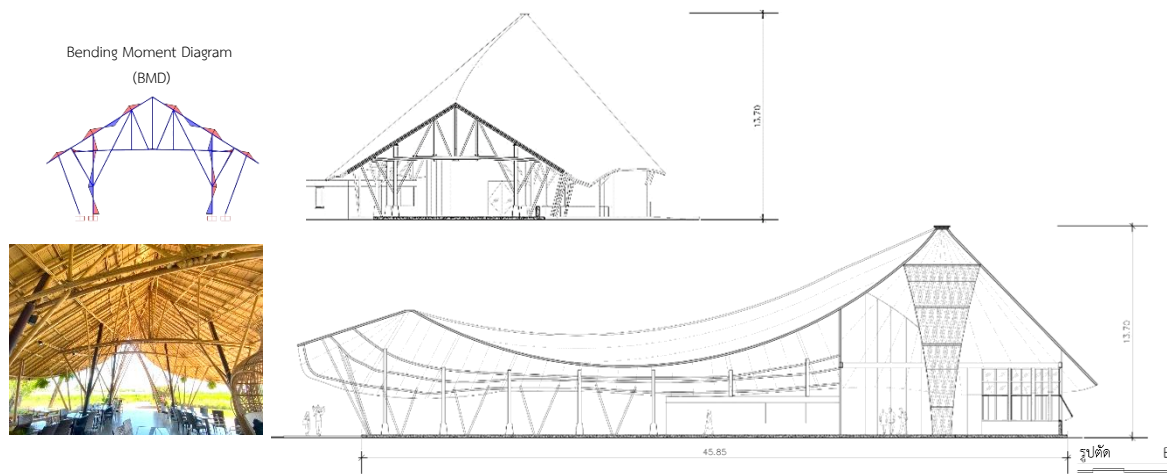
• การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง พบลักษณะการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง เป็นการผสมผสานใน 2 รูปแบบ คือ (1) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวเส้นโค้ง ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวเส้นตรง มีระยะห่างด้านข้างของแต่ละโครงเฟรมประมาณ 3.60-3.80 เมตร เรียงต่อเนื่องกันไปจำนวน 8 โครงเฟรม ระดับความสูงของแต่ละโครงเฟรมนั้นมีขนาดไม่เท่ากัน โดยโครงถักครอบคลุมที่ว่างของพื้นที่เปิดโล่ง ซึ่งคล้ายกับสองอาคารที่ผ่านมา (2) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวรัศมี บริเวณพื้นที่ด้านในสุดของอาคาร พบว่าผังพื้นมีลักษณะเป็นวงกลม มีระยะรัศมี 6.00 และ 7.60 เมตร ส่งผลต่อลักษณะของหลังคาทรงกรวยคว่ำและตำแหน่งการเปิดช่องแสงด้านบนสุดของหลังคา (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบผสมผสานระหว่าง แนวเส้นโค้งกับแนวรัศมีของอาคาร Central Restaurant
Figure 11 Mixed-configuration between curved and centralized configuration in Central Restaurant



รูปที่ 12 ผังพื้นและรูปด้านอาคาร Central Restaurant
Figure 12 Floor plan and elevation of Central Restaurant



รูปที่ 13 แผนภาพโมเมนต์ดัดและรูปตัดอาคาร Central Restaurant
Figure 13 Bending Moment Diagram of Central Restaurant

5.4 อาคาร South Restaurant

• การใช้งานพื้นที่และขนาดอาคาร อาคาร South Restaurant เป็นอาคารสาธารณะประเภทร้านอาหาร ให้บริการอาหารพื้นถิ่นของภาคใต้ มีการใช้งานหลัก คือ เป็นพื้นที่นั่งรับประทานอาหารแบบเปิดโล่ง ขนาดอาคารมีความกว้าง 12 เมตร ความยาว 12 เมตร พื้นที่ใช้สอย 144 ตารางเมตร ความสูง 9.50 เมตร สามารถบรรจุผู้ใช้งานอาคารได้ 50-60 คน มีการวางอาคารขนานกับถนนด้านหน้าและหลังต้นไม้ โดยอาคาร อาคาร South Restaurant เป็นอาคารหลักของร้าน และมีอาคารประกอบอื่น ๆ เช่น บ้านพักอาศัยของเจ้าของ เรือนครัว ชุมนั่ง และห้องน้ำ โดยการเชื่อมโยงอาคารประกอบใช้เส้นทางการสัญจรที่ยกระดับจากพื้นดินประมาณ 80 เซนติเมตร เนื่องจากที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มต่ำ ส่วนระดับพื้นอาคารอยู่ที่ 1.15 เมตร (รูปที่ 15)

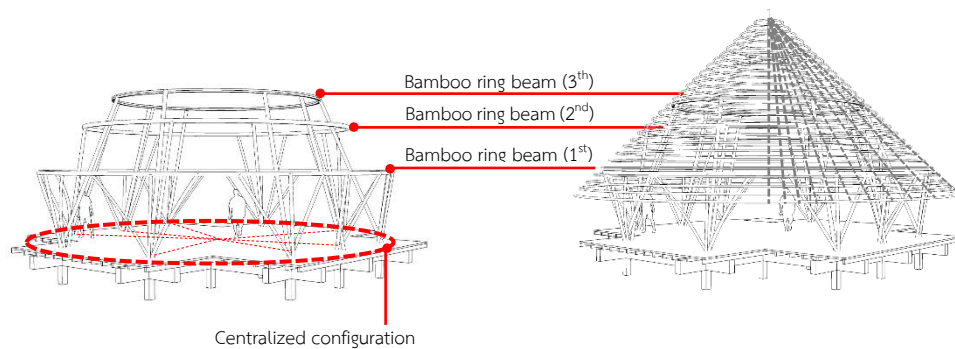
• ลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรม มีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิต มีที่ว่างภายในเชื่อมโยงกับที่ว่างภายนอก ไม่มีการปิดกั้นด้วยระบบผนัง รูปทรงภาพรวมใช้หลังคาทรงกรวยคว่ำ อย่างไรก็ตามลักษณะของหลังคาไม่ได้มีความสมมาตรกันจนเกินไป เนื่องจากบนหลังคามีการเปิดช่องแสงและช่องลมสำหรับระบายอากาศไว้ 2 ทิศทาง จากการสัมภาษณ์เจ้าของอาคาร พบว่า อาคารมีลักษณะโค้งมนทุกทิศทางนั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยด้านที่ตั้งที่อยู่ใกล้ทะเล ทำให้มีกระแสลมพัดผ่าน นอกจากนี้เจ้าของอาคารยังมีความชื่นชอบและประทับใจในวัสดุไม้ ได้เดินทางสั่งสมประสบการณ์เกี่ยวกับการใช้ไม้ในการก่อสร้างจากหลายพื้นที่ มียกระดับวัสดุไม้เพื่อใช้เป็นวัสดุที่สร้างคุณค่า สร้างอัตลักษณ์ ตอบสนองต่อประสบการณ์การรับรู้ผ่านประสาทสัมผัส สื่อสารถึงความเป็นวัสดุในท้องถิ่น (local material) ที่ให้ความรู้สึกอ่อนโยน สบายตา สบายกาย สบายใจ ซึ่งสอดคล้องกับรายการอาหารท้องถิ่นภาคใต้ของทางร้าน (local food) โดยใช้วัสดุดิบและผักพื้นบ้านปลอดสารพิษ จากแหล่งชุมชนและพื้นที่ใกล้เคียง อันเป็นวิสัยทัศน์ที่เจ้าของตั้งใจให้เกิดเป็นความยั่งยืน ตั้งแต่กระบวนการจัดหาวัตถุดิบไปจนถึงรูปแบบของสถาปัตยกรรม

• การก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น โดยชิ้นส่วนโครงสร้างของอาคารเกิดจากรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้นในลักษณะของโครงสร้างเสารับน้ำหนัก ที่แผ่กระจายออกจากจุดศูนย์กลางเดียวกัน เพื่อรับหลังคาแผ่นผืน (Surface roof) ซึ่งไม่ได้มีลักษณะเป็นโครงเฟรมเหมือนสามอาคารที่ผ่านมา โดยระบบโครงสร้างหลังคาจะมีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นมากกว่าในส่วนองเสา ใช้ไม้ตงและไม้สลุกลงในการเป็นชิ้นส่วนเสารับแรงอัด เหตุเพราะมีขนาดหน้าตัดใหญ่ มีผนังลำไม้ที่หนา สามารถรับแรงอัดได้ดี โดยเสาแต่ละต้นทำหน้าที่รับแรงในโครงสร้างแตกต่างกัน เช่น บางต้นรับแรงอัดที่ถ่ายมาจากอะเสววงแหวน ดังแสดงในแผนภาพโมเมนต์ดัด (รูปที่ 17) บางต้นเป็นค้ำยันชายคาเพื่อป้องกันแรงลมกระพือชายคา ซึ่งบริเวณที่ตั้งอาคารอยู่ภาคใต้ มีลักษณะภูมิประเทศใกล้ทะเล ทำให้มีลมมาจากทุกทิศทาง การกระจายเสาออกเป็นกลุ่ม จะช่วยให้อาคารมีเสถียรภาพในการรับแรงลมที่ปะทะรอบอาคาร

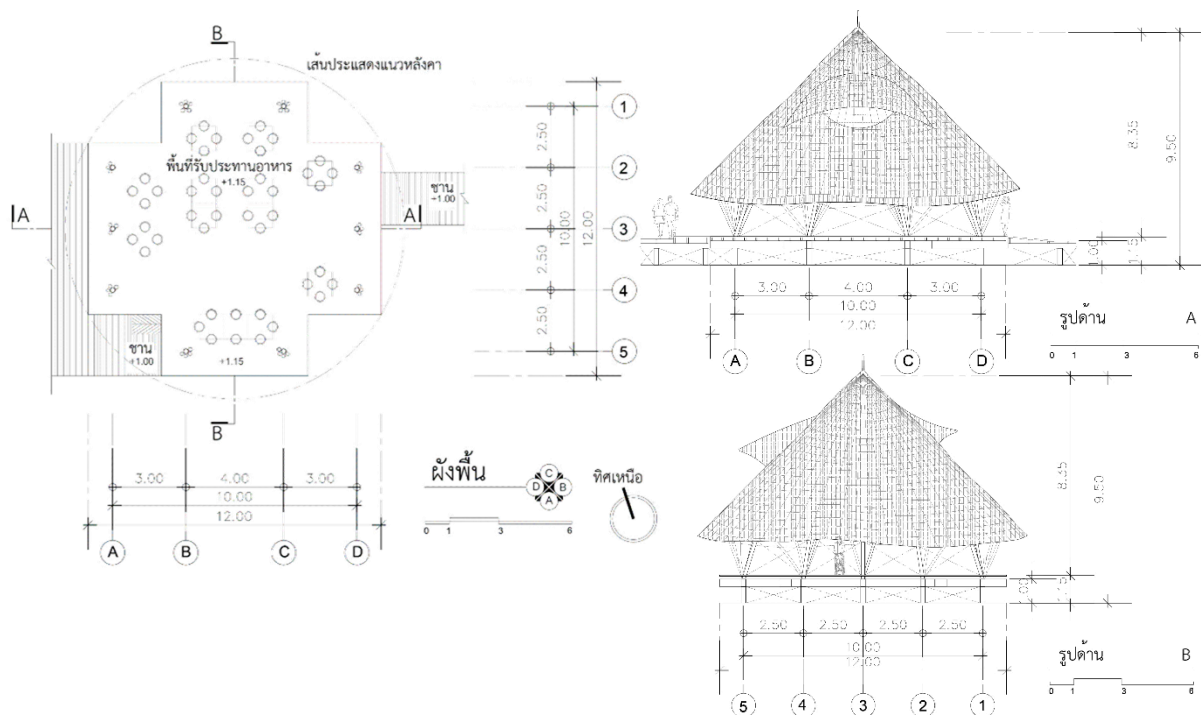
• การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง พบลักษณะการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวรัศมีหรือรวมศูนย์ (Centralized configuration) แม้ว่าอาคารจะมีผังพื้นเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่มีการจัดวางเสากลุ่มให้กระจายออกในแนวรัศมีของหลังคา มีทั้งหมด 10 กลุ่ม เสากลุ่มที่ห่างกันมากที่สุดมีระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.00 เมตร แต่ละกลุ่มถ่ายแรงผ่านฐานรองรับแบบ

ยึดแน่นลงบนเสาตอม่อ แต่ละตอม่อถูกจัดวางในระบบเสาแบบสี่เหลี่ยม มีระยะห่างระหว่างเสาแต่ละกลุ่ม (bay) คือ 2.50 เมตร และ 4.00 เมตร พบการจัดวางกลุ่มเสา ใน 4 ลักษณะ ดังนี้

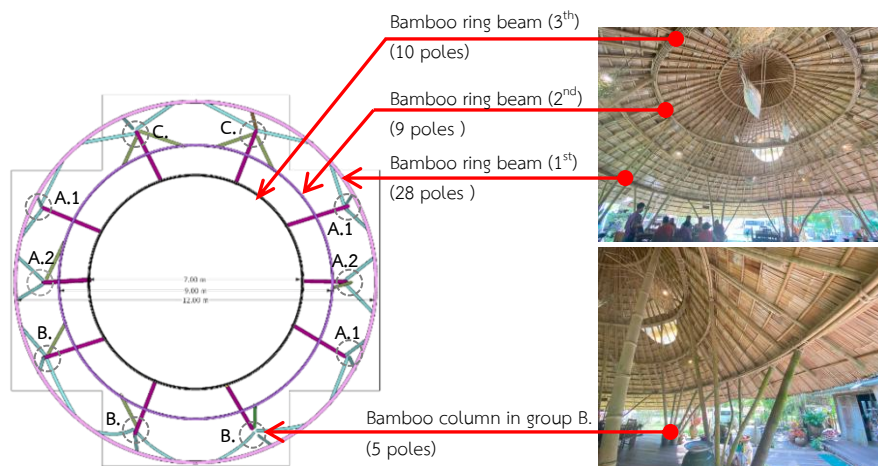
- เสากลุ่ม A.1 ประกอบไปด้วยเสาไม้ 4 ต้น รับน้ำหนักอะเสวแหวน ชั้นที่ 1 และ 3 (รูปที่ 16)
- เสากลุ่ม A.2 ประกอบไปด้วยเสาไม้ 4 ต้น รับน้ำหนักอะเสวแหวน ชั้นที่ 1-2-3
- เสากลุ่ม B.ประกอบไปด้วยเสาไม้ 5 ต้น รับน้ำหนักอะเสวแหวน ชั้นที่ 1-2-3
- เสากลุ่ม C. ประกอบไปด้วยเสาไม้ 6 ต้น รับน้ำหนักอะเสวแหวน ชั้นที่ 1-2-3



รูปที่ 14 การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแบบรัศมีของอาคาร South Restaurant
Figure 14 Centralized configuration in South Restaurant



รูปที่ 15 ผังพื้นและรูปด้านอาคาร South Restaurant
Figure 15 Floor plan and elevation of South Restaurant



รูปที่ 16 รายละเอียดเสาและวงรับแสงแหวน

Figure 16 Detail of Bamboo column and Bamboo ring beam



รูปที่ 17 แผนภาพโมเมนต์ดัดและรูปตัดอาคาร South Restaurant

Figure 17 Bending Moment Diagram of South Restaurant

6. ผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์ นำไปสู่การสรุปผลการศึกษาในประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

6.1 ลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรม ของอาคารกรณีศึกษาทั้ง 4 หลัง พบลักษณะร่วมบางประการ ได้แก่

1) รูปทรงที่ก่อให้เกิดพื้นที่ว่าง พบลักษณะรูปทรงที่ก่อให้เกิดพื้นที่ว่าง 2 ลักษณะ คือ (1) รูปทรงที่เชื่อมโยงกับภายนอก (open form) พบทั้ง 4 อาคาร ซึ่งอาคาร Thai Cooking School และอาคาร South Restaurant มีลักษณะพื้นที่เปิดโล่งเชื่อมโยงกับภายนอกตลอดแนวอาคาร (2) รูปทรงปิดล้อม (close form) พบในอาคาร Sport Hall in School ซึ่งเป็นพื้นที่ห้องเก็บของ และอาคาร Central Restaurant ซึ่งเป็นส่วนของห้องครัวและโซนปรับอากาศ ดังนั้นทั้งสองอาคาร จึงมีลักษณะของการผสมผสานระหว่างรูปทรงที่เชื่อมโยงกับภายนอกกับรูปทรงปิดล้อม เป็นผลมาจากการใช้งานพื้นที่และประโยชน์ใช้สอยที่มีความต้องการในการปิดล้อมที่ว่างที่แตกต่างกัน ส่วนรูปทรงที่มีว่างภายในเชื่อมโยงกับที่ว่างภายนอกอาคาร แสดงถึงความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมและภูมิอากาศ ก่อให้เกิดพื้นที่เปิดโล่งมากกว่าพื้นที่ปิดล้อมในผังพื้นที่ ทำให้อากาศไหลเวียน ลดปัญหาความอับชื้นภายในอาคาร อันเป็นสาเหตุของการเกิดเชื้อราในผิวไม้ ซึ่งจะช่วยให้ลำไยมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ขณะเดียวกันการมีช่องลมให้อากาศเข้าและออกจากอาคารได้สะดวกนั้น จะช่วยลดปัญหาเรื่องแรงลมยกกระเบื้องได้อีกด้วย

2) รูปทรงสถาปัตยกรรม พบลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรม 2 ลักษณะ คือ (1) รูปทรงอินทรีย์ เน้นการใช้เส้นโค้งอิสระ มีความอ่อนช้อย พลั้วไหวตลอดแนวสันหลังคา ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปด้านอาคาร ดังที่พบในอาคาร Sport Hall in

School อาคาร Thai Cooking School และอาคาร Central Restaurant (2) รูปทรงเรขาคณิต ลักษณะทรงกรวยคว่ำแบบไม่สมมาตร (asymmetrical balance) พบในอาคาร South Restaurant ซึ่งมีข้อแตกต่างจากอาคารอื่น คือ ไม่มีสันหลังคายาวต่อเนื่อง ให้ความรู้สึกโดดเด่นและเป็นจุดศูนย์กลาง โดยรูปทรงทั้งสองลักษณะนั้น นอกจากจะเป็นผลมาจากแนวคิดและแรงบันดาลใจของผู้ออกแบบแล้ว ยังเป็นผลจากปัจจัยทางด้านที่ตั้งอาคาร ซึ่งอยู่กลางพื้นที่โล่งขนาดใหญ่ ทำให้มีกระแสลมไหลผ่าน ดังนั้นการออกแบบรูปทรงที่ช่วยลดแรงปะทะของลมจึงถูกนำมาพิจารณา โดยรูปทรงที่มีความโค้งมน (curved form) ช่วยให้อาคารมีความกลมตามหลักพลศาสตร์ (aerodynamic design) สามารถลดแรงลมที่กระทำด้านข้าง (lateral load) และทำให้สถาปัตยกรรมนั้นไม่ด้านทวนหรือกีดขวางการไหลของกระแสลม ขณะที่ขนาดของรูปทรงอาคาร มีความสูงเฉลี่ยไม่เกิน 15.00 เมตร และพื้นที่ใช้สอยรวมไม่เกิน 1,000 ตารางเมตร ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร กฎกระทรวงฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543)

นอกจากนี้ยังพบข้อสังเกตต่อตำแหน่งช่องเปิด หรือช่องลมในรูปทรงสถาปัตยกรรม เป็นการเพิ่มความสามารถของการไหลของลมและการถ่ายเทอากาศ ขณะเดียวกันช่องลมดังกล่าวยังทำหน้าที่เป็นช่องแสง ที่ช่วยลดความสลับของพื้นที่บริเวณช่วงตรงกลางอาคารได้ ซึ่งปรากฏในกายภาพรูปทรงสถาปัตยกรรม ดังเช่น การใช้ระบบหลังคาซ้อนชั้น เป็นการซ้อนชั้นของโครงสร้างหลังคา เพื่อให้เกิดช่องลมระบายอากาศ และช่องแสงเพื่อให้มีปริมาณแสงธรรมชาติส่องลงบริเวณกลางอาคาร ลดการเปิดไฟในช่วงเวลากลางวัน อันเป็นแนวทางหนึ่งที่สนับสนุนแนวคิดในการออกแบบสถาปัตยกรรมยั่งยืนด้วยเช่นกัน

6.2 ลักษณะการก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น และการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง

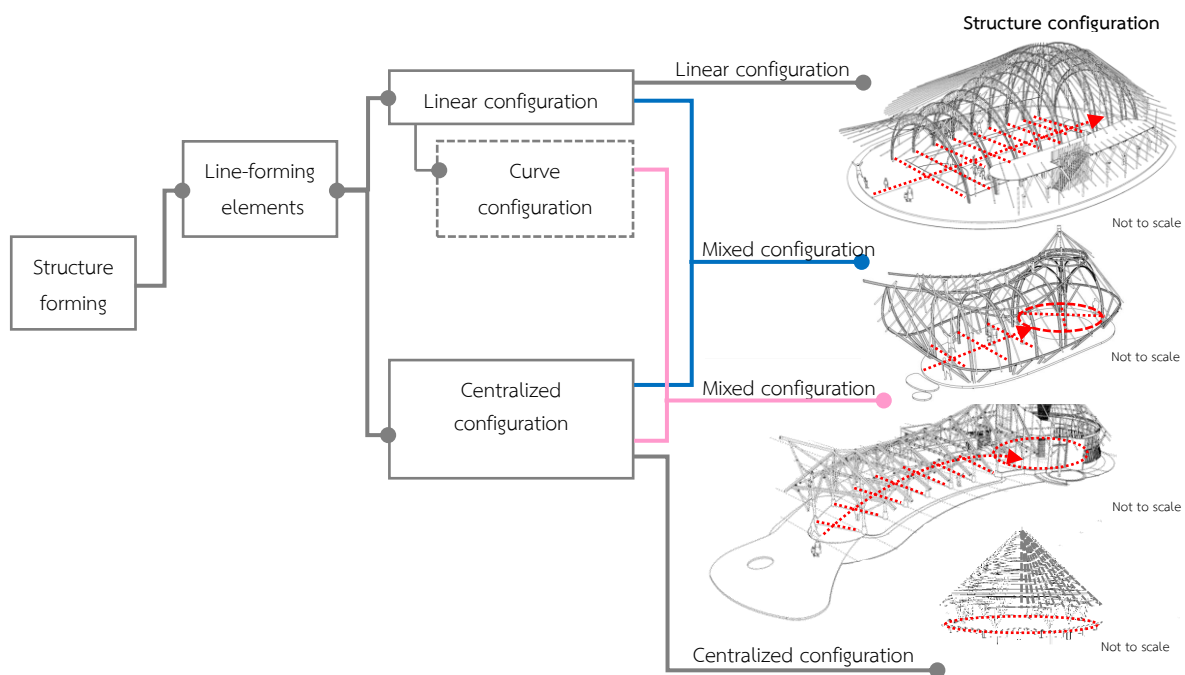
1) ลักษณะรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น พบใน 3 ลักษณะ คือ (1) รูปทรงโครงสร้างแบบโครงถัก (Bamboo truss) พบในอาคาร Central Restaurant ใช้โครงถักแบบ Howe truss ในลักษณะรูปทรงสามเหลี่ยมร่วมกับเสาไม้จริง (เสาไม้ประดู่) และอาคาร Sport Hall in School ใช้โครงถักแบบ Warren with vertical truss ในลักษณะรูปทรงโค้งครึ่งวงกลมร่วมกับโครงเฟรมโค้งด้วยไม้รวกดำมัดรวบลำ (2) รูปทรงโครงสร้างแบบเฟรมโค้ง (Bamboo bundle frames) พบในอาคาร Thai Cooking School ซึ่งไม่มีระยะความลึกของตัวยันตัวยึด (Web member) ในขณะอาคาร Sport Hall in School มีลักษณะเป็นเฟรมโค้งที่มีระยะความลึกของตัวยันตัวยึด จึงเป็นการผสมผสานระหว่างรูปทรงโครงเฟรมโค้งเข้ากับโครงถัก (3) รูปทรงแบบเสาแฉับหลังคาแผ่นผืน (Bamboo column and surface roof) พบในอาคาร South Restaurant โดยลักษณะรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น ทั้ง 3 ลักษณะนี้ สามารถคัดแยกกระบบโครงสร้างตามพฤติกรรมการรับแรงได้ 2 รูปแบบ คือ ระบบโครงเฟรม และระบบเสารับน้ำหนัก

2) ลักษณะการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง พบใน 3 ลักษณะ คือ (1) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง พบในอาคาร Sport Hall in School (2) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวรัศมีหรือรวมศูนย์ พบในอาคาร South Restaurant (3) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวผสมผสาน พบในอาคาร Thai Cooking School ซึ่งเป็นการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรงผสมกับแนวรัศมี และอาคาร Central Restaurant เป็นการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นโค้งผสมกับแนวรัศมี โดยการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวผสมผสานนี้ ถือเป็นการขยายขอบเขตทฤษฎีการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง อันเป็นข้อค้นพบเพิ่มเติมอีกด้วย (รูปที่ 18)

ขณะเดียวกันการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละลักษณะนั้น ให้พิจารณาการออกแบบการจัดวางระบบที่วางในผังพื้นร่วมด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะของหลังคาที่ปรากฏในรูปด้าน โดยการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง แนวเส้นโค้ง และแนวผสมผสาน ส่งผลต่อความยาวของสันหลังคา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดลักษณะความเป็นรูปทรงอินทรีย์ ที่สร้างความรู้สึกอ่อนช้อยและความพลิ้วไหวให้เกิดขึ้นบนหลังคา ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นได้ด้วยวิธีการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นให้มีความสูงแตกต่างกัน ขณะเดียวกันยังทำให้ปริมาตรที่ว่างภายในอาคารมีความสั่นไหวต่อเนื่อง ในขณะที่การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวรัศมี ก่อให้เกิดหลังคาทรงกรวยคว่ำ และปริมาตรที่ว่างภายในอาคารมีความแน่นยำให้เห็นถึงความเป็จุดศูนย์กลาง

นอกจากนี้ยังพบว่า การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง แนวเส้นโค้ง และแนวผสมผสานนั้น มีข้อค้นพบสำคัญที่นำไปสู่การเกิดลักษณะเฉพาะในระบบโครงสร้าง คือ การใช้ระบบค้ำยันหรือโครงแกนง (Bracing system) ซึ่งเป็นระบบยึดรั้งชิ้นส่วนโครงสร้างเข้าด้วยกัน ทั้งการค้ำยันในแนวตั้งระหว่างโครงเฟรมแต่ละตัว (vertical bracing) และการค้ำยันในแนวนอน (horizontal bracing) ที่พบในโครงสร้างหลังคา ด้วยการเพิ่มความถี่ของจำนวนแปและอะเส ทำให้ระบบโครงสร้างหลังคาถูกยึดรั้งเข้าเป็นแผ่นผืนเดียวกัน หรือที่เรียกว่า Surface roof ซึ่งลักษณะของระบบยึดรั้งชิ้นส่วนโครงสร้างนี้ เป็นผลมาจากการออกแบบเพื่อรับแรงกระทำด้านข้างโดยเฉพาะแรงลม ที่จะทำให้โครงสร้างเกิดโยกตัวหรือการเอนเอียง สามารถพบได้ในระบบโครงสร้างอาคารไม้ และโครงสร้างอาคารเหล็ก ทั้งนี้พบข้อสังเกตว่าอาคารกรณีศึกษาทั้ง 4 หลัง มีการประกอบยึด

โครงสร้างไม่เหนือพื้นดินเข้ากับระบบฐานรากในลักษณะเหมือนกัน คือ ถ่ายแรงผ่านฐานรองรับแบบยึดแน่นไม่เคลื่อนที่ (fixed support) โดยใช้วัสดุประสานประเภทคอนกรีตผสมน้ำยากันซึม เพื่อยึดโครงสร้างทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน ซึ่งมีข้อดีคือ (1) เป็นเทคนิคที่สามารถทำได้สะดวกและลำไม่สัมผัสพื้นดินโดยตรง นำไปสู่การยืดอายุการใช้งานอาคารตามหลักการการออกแบบที่ช่วยสร้างความคงทน (Durability by design) และการออกแบบที่ช่วยลดความเสียหาย (Protection by design) เช่น อาคาร South Restaurant ในประเทศไทย เป็นอาคารสาธารณะที่มีอายุอาคาร 12 ปี อาคาร Heart of Green School ในเกาะบาหลี่ ประเทศอินโดนีเซีย เป็นอาคารเรียนที่มีอายุกว่า 18 ปี (2) ฐานรองรับแบบ fixed support สามารถต้านทานแรงกระทำได้มากกว่า 2-3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างโค้งที่ใช้จุดรองรับแบบหมุนได้แต่ไม่เคลื่อนที่หรือแบบบานพับ (hinged support) ตามที่ Maurina and Prastyatama (2017) ได้เสนอไว้



รูปที่ 18 การขยายขอบเขตทฤษฎีการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ด้วยการก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น
Figure 18 Expanding the scope of Structural configuration by Line-forming elements

7. การอภิปรายผล สรุป และข้อเสนอแนะ

7.1 อภิปรายผล การศึกษาในครั้งนี้ สามารถอภิปรายผลใน 2 ประเด็นใหญ่ ๆ ที่นำไปสู่ข้อค้นพบสำคัญ ดังนี้

7.1.1 ความแตกต่างของรูปทรงสถาปัตยกรรม กับการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ภายใต้การก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น ของอาคารกรณีศึกษา พบว่ามี 3 ลักษณะ ได้แก่

(1) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง ก่อให้เกิดรูปทรงสถาปัตยกรรมแบบอินทรีย์ ในลักษณะที่มีสันหลังคายาวต่อเนื่อง ดังพบในอาคาร Sport Hall in School (รูปที่ 20)

(2) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวรัศมีหรือรวมศูนย์ ก่อให้เกิดรูปทรงสถาปัตยกรรมแบบเรขาคณิต ในลักษณะหลังคาทรงกรวยคว่ำ ดังพบในอาคาร South Restaurant (รูปที่ 20)

(3) การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวผสมผสาน ก่อให้เกิดรูปทรงสถาปัตยกรรมแบบอินทรีย์ ในลักษณะที่มีสันหลังคายาวต่อเนื่องร่วมกับหลังคาทรงกรวยคว่ำ ดังพบในอาคาร Thai Cooking School เป็นการผสมระหว่างการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรงเข้ากับแนวรัศมี และอาคาร Central Restaurant เป็นการผสมระหว่างการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นโค้งเข้ากับแนวรัศมี (รูปที่ 20)

การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละลักษณะนั้น นอกจากจะส่งผลต่อลักษณะรูปทรงที่ปรากฏแล้วนั้น ยังส่งผลต่อการจัดวางระบบที่วางด้วย กล่าวคือ การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวรัศมี ทำให้เกิดพื้นที่แบบศูนย์กลาง เน้นย้ำถึงความโดดเด่นของที่ว่างภายใต้หลังคาทรงกรวยคว่ำ ให้ความรู้สึกหยุดนิ่ง ไม่เคลื่อนไหว ในขณะที่การจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง

แนวเส้นโค้ง และแนวผสมผสาน ก่อให้เกิดความต่อเนื่องของที่ว่างภายในอาคาร ให้ความรู้สึกสโลว์ ไหล ไม่หยุดนิ่ง รวมถึงรูปทรงหลังคาพลิ้วไหวที่ส่งผลต่อลักษณะความเป็นสถาปัตยกรรมรูปทรงอินทรีย์ ประเด็นนี้ถือเป็นข้อสนับสนุนและเชื่อมโยงไปยังการศึกษาของ Nurdiah (2016) ที่ว่าลักษณะความเป็นรูปทรงอินทรีย์นั้น ถูกนำมาใช้ในรูปทรงของหลังคา อย่างไรก็ตามงานของ Nurdiah ยังขาดการอภิปรายถึงประเด็นความแตกต่างของการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างที่ส่งผลต่อรูปทรงสถาปัตยกรรม และลักษณะของรูปทรงอินทรีย์นั้น เกิดขึ้นได้ด้วยวิธีการใด ซึ่งการศึกษานี้มีข้อค้นพบเพิ่มเติมว่า การสร้างสรรค์กายภาพสถาปัตยกรรมรูปทรงอินทรีย์ ให้ความรู้สึกอ่อนช้อย เส้นสายอิสระ เป็นธรรมชาติ หรือเรียกโดยรวมว่าลักษณะความเป็น Organic form ของอาคารกรณีศึกษา เกิดจากปัจจัยด้านการออกแบบโครงสร้างใน 4 ส่วน ดังนี้

(1) การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างหลัก ให้อยู่ในรูปทรงโครงถักหรือโครงเฟรม โดยที่แต่ละโครงเฟรมมีระดับความสูงแตกต่างกัน สามารถสังเกตได้จากรูปตัดตามยาวของอาคารแต่ละหลัง (รูปที่ 18)

(2) ความแตกต่างของลักษณะการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง แนวเส้นโค้ง และแนวผสมผสาน ร่วมกับการออกแบบผังพื้นที่มีการจัดลำดับที่ว่างตามแนวยาว ก่อให้เกิดรูปทรงหลังคาที่มีสันหลังคายาวต่อเนื่อง ทั้งแบบเส้นโค้งคว่ำลง และเส้นโค้งหงายขึ้น ในทางตรงกันข้ามการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวรัศมี ร่วมกับการจัดผังพื้นที่ที่มีการรวมศูนย์ของที่ว่างหรือลักษณะวงกลม ก่อให้เกิดรูปทรงหลังคาที่มีลักษณะทรงกรวยคว่ำ โดยความสัมพันธ์ของรูปทรงหลังคากับการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละลักษณะนั้น สามารถสังเกตได้จากรูปด้านอาคาร (รูปที่ 19)

(3) ความแตกต่างขององศาในการวางจันทันและแป ซึ่งเป็นผลมาจากชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นมีความสูงไม่เท่ากัน ทำให้การพาดตัวของจันทันจันทันและแป มีจังหวะที่ก่อให้เกิดความพลิ้วไหวในรูปทรงหลังคา (รูปที่ 7, 10, 11)

(4) ชนิดพันธุ์ไม้ที่ใช้ในระบบโครงสร้างหลังคา พบว่า สกุลไผ่รวก (Thyrsostachys) โดยเฉพาะไผ่รวกดำ (Thyrsostachys oliveri Gamble) มีบทบาทสำคัญในการกำหนดเส้นความโค้งของแป อะเส อกโก เนื่องจากไผ่รวกดำมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เป็นจุดเด่น คือ ช่องกลวงน้อย ลำเล็ก มีดรวบหลายลำได้ และมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม คือ มีศักยภาพในการรับแรงดึงและแรงดัดได้ดี มีเส้นใยเหนียว สามารถดัดโค้งโดยไม่แตกหักง่าย จึงทำให้สกุลไผ่รวก มีบทบาทอย่างมากในการนำไปใช้งานลักษณะที่ถูกดัด เพื่อกำหนดรูปทรงของหลังคา ดังที่พบในหลังคาทรงกระดองเต่า ซึ่งมีองค์ประกอบที่เรียกว่า “กวางตุบ” หรือ แปโค้ง พบได้ในเรือนพื้นถิ่นของกลุ่มชาติพันธุ์ไทดำ นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้เป็นแปเพื่อกำหนดโค้งอ่อนช้อยให้เกิดขึ้นในรูปทรงหลังคา พบในงานสถาปัตยกรรมไผ่ร่วมสมัยด้วยเช่นกัน โดยความสำคัญของแปโค้งเหล่านี้ ไม่เพียงแต่กำหนดเส้นสายที่พลิ้วไหวในสถาปัตยกรรมเท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่ในเชิงโครงสร้าง คือ เป็นชิ้นส่วนยึดรั้งตามแนวนอนหรือที่เรียกว่า Horizontal bracing เพื่อป้องกันไม่ให้โครงสร้างเกิดการโยกตัวด้านข้าง เนื่องจากแรงกระทำของลม ซึ่งพบได้ในระบบโครงสร้างหลังคาของอาคาร Sport Hall in School อาคาร Thai Cooking School อาคาร Central Restaurant และในชิ้นส่วนอะเสวงแหวนของอาคาร South Restaurant

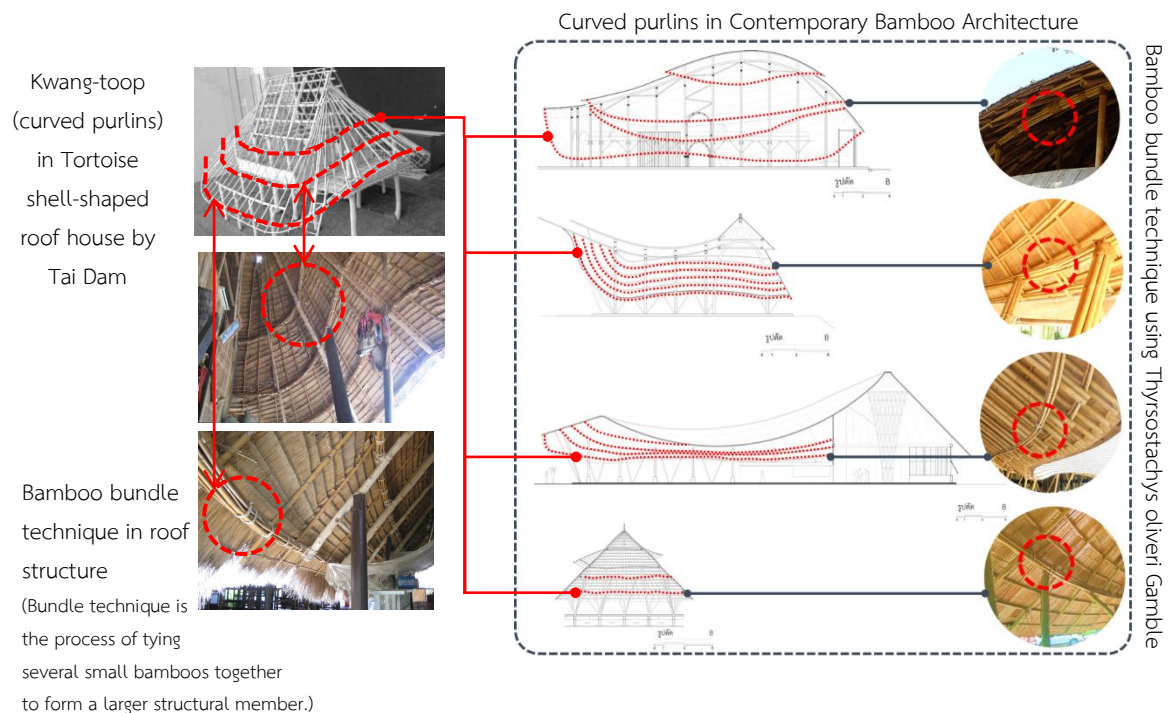
ดังนั้นการอภิปรายผลในประเด็นนี้จึงเป็นการขยายขอบเขตเชิงหลักการ ในการออกแบบเพื่อสร้างสรรค์รูปทรงสถาปัตยกรรมแบบอินทรีย์ ที่เกิดจากการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างในลักษณะต่าง ๆ นั้น สามารถตอบสนองต่อแนวคิดแรงบันดาลใจในการออกแบบ และความต้องการของเจ้าของอาคาร ขณะเดียวกันยังแสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกันระหว่างสถาปนิก วิศวกร และทีมช่างผู้ก่อสร้างอีกด้วย

7.1.2 สถาปัตยกรรมไผ่ร่วมสมัยรูปทรงอินทรีย์ ภายใต้การพัฒนาจากรูปร่างโครงสร้างเรขาคณิต

แม้ว่าอาคารกรณีศึกษาจะมีลักษณะรูปทรงสถาปัตยกรรมเป็นแบบอินทรีย์ ในทางตรงกันข้ามรูปทรงโครงสร้างหลักกลับมีลักษณะมาจากการประกอบกันของรูปร่างเรขาคณิต หากพิจารณาลงในรายละเอียดของระบบโครงสร้างของแต่ละอาคารที่เป็นกรณีศึกษา พบรูปร่างเรขาคณิตในชิ้นส่วนโครงสร้าง 2 ลักษณะ คือ (1) รูปร่างโครงสร้างหลักกับรูปร่างหลังคาแยกส่วนกัน ดังพบในอาคาร Sport Hall in School และ Thai Cooking School ก่อให้เกิดการซ้อนชั้นของหลังคา นำไปสู่ช่องแสงและช่องลมเพื่อการไหลเวียนและระบายอากาศ (2) รูปร่างโครงสร้างหลักกับรูปร่างหลังคาเป็นส่วนเดียวกัน ไม่มีการซ้อนชั้นของหลังคา ใช้วิธีการเปิดช่องแสงและช่องลมในช่วงบนของหลังคา ดังพบในอาคาร Central Restaurant และ South Restaurant

ขณะเดียวกันการศึกษา ยังพบว่ารูปทรงสถาปัตยกรรมของอาคารกรณีศึกษา นอกจากจะมีความสัมพันธ์กับการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างและการจัดวางที่ว่างในผังพื้นแล้วนั้น ยังเกิดจากปัจจัยทางด้านประโยชน์ใช้สอยของรูปทรงที่ช่วยลดแรงปะทะของลม ซึ่งเป็นหน้าที่หลักของรูปทรง (function of form) ในทางเดียวกันรูปทรงสถาปัตยกรรมยังมีความเกี่ยวเนื่องกับแนวคิดและแรงบันดาลใจของผู้ออกแบบ ซึ่งทำให้รูปทรงนั้นมีความหมาย (meaning of form) สำหรับสื่อสารกับผู้ใช้งาน

อาคาร โดยพบข้อสังเกตในแง่มุมมองที่ว่าการเกิดขึ้นของรูปทรงสถาปัตยกรรมนั้น มีความหมายอ้างอิงกับรูปทรงธรรมชาติ อย่างไรก็ตามประเด็นดังกล่าวนี้มีเนื้อหาเชิงลึกอยู่มาก จึงอยู่นอกเหนือขอบเขตการนำเสนอในครั้งนี้



รูปที่ 19 ความคล้ายคลึงของกวางตูปในเรือนไทดำ กับแปโค้งของอาคารกรณีศึกษา ใช้เทคนิคการดัดและมัดรวบลำไผ่ เพื่อกำหนดความโค้งมนในรูปทรง

Figure 19 The similarity of the Kwang-toop in Tai Dam house and curve purlin in case studies using bamboo bending and bamboo bundle technique for creating the curvature in a form

7.2 สรุปผล

จากคุณลักษณะทางกายภาพความเป็นลำ ทำให้ไผ่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ก่อรูปทรงโครงสร้างองค์ประกอบเชิงเส้นในหลายลักษณะ ซึ่งเป็นการใช้งานไผ่แบบเต็มลำ ส่งผลให้รูปทรงโครงสร้างหลักอยู่ในลักษณะชิ้นส่วนประกอบ (Skeleton structure) ที่สามารถรับแรงและน้ำหนักบรรทุกทุกได้ อันแสดงถึงความสามารถของไผ่ในฐานะวัสดุโครงสร้าง ที่ลดข้อจำกัดเรื่องระยะช่วงพาดสั้น ในขณะเดียวกันจากคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงดัดและแรงดึง ส่งผลให้เกิดการใช้งานแบบดัดโค้ง ที่นำไปสู่การสร้างสรรครูปทรงสถาปัตยกรรมแบบอินทรีย์ ที่สอดคล้องกับแนวความคิดของสถาปนิก ความต้องการของเจ้าของอาคาร และกลุ่มผู้ใช้งานอาคารได้ โดยการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปความสัมพันธ์ของรูปทรงสถาปัตยกรรมและการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ได้ใน 3 ลักษณะ คือ

- (1) สถาปัตยกรรมรูปทรงอินทรีย์ ในลักษณะที่มีสันหลังคายาวต่อเนื่อง เกิดจากการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง ร่วมกับการออกแบบผังพื้นในลักษณะเส้นตรง เช่น อาคาร Sport Hall in School
- (2) สถาปัตยกรรมรูปทรงอินทรีย์ ในลักษณะที่มีสันหลังคายาวต่อเนื่องผสมกับหลังคาทรงกรวยคว่ำ เกิดจากการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวผสมผสาน ร่วมกับการออกแบบผังพื้นในลักษณะเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ผสานกับผังพื้นวงกลมบริเวณพื้นที่ด้านในสุดของอาคาร เช่น อาคาร Thai Cooking School และอาคาร Central Restaurant
- (3) สถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิต ในลักษณะหลังคาทรงกรวยคว่ำ เกิดจากการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวรัศมี ร่วมกับการออกแบบผังพื้นในลักษณะที่เป็นวงกลมหรือศูนย์กลาง

จากความสัมพันธ์ทั้ง 3 ลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่า แม้ว่าลักษณะความเป็นรูปทรงอินทรีจะเกิดขึ้นในส่วนของหลังคา ดังที่ Nurdiah (2016) ได้กล่าวไว้ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังมีข้อค้นพบว่า ลักษณะของการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างรวมกับการจัดวางที่ว่างในระบบผังพื้น ยังถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่างของรูปทรงสถาปัตยกรรมด้วยเช่นกัน ซึ่งถือข้อค้นพบที่เติมเต็มช่องว่างทางการศึกษาต่อจากงานของ Nurdiah (2016) และงานของ Maurina and Prastyatama (2017) สามารถสรุปองค์ความรู้จากการศึกษาได้ ดังนี้

(1) คุณลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติในการรับแรงของลำไม้ ส่งผลให้ไม้มีศักยภาพในการเป็นโครงสร้างรับน้ำหนัก (load-bearing structure) บนพื้นฐานการก่อรูปทรงโครงสร้างจากองค์ประกอบเชิงเส้น สามารถใช้งานไม้แบบลำเดียวในการเป็นโครงสร้างหลักของอาคาร เช่น เสากลุ่ม เสาค้ำยันชายคา เป็นชิ้นส่วนที่มีการรับแรงมาก เช่น ไม้ตง ไม้ซาง ไม้ป่า ไม้สีสุก เป็นต้น หรือใช้งานแบบมัดรวบหลายลำเข้าด้วยกัน ให้เกิดเป็นรูปทรงโครงสร้างโค้งในลักษณะชิ้นส่วนประกอบ (Skeleton structure) ที่รับหลังคาแผ่นผืน (Surface roof) ทั้งนี้ให้พิจารณาชนิดพันธุ์และลักษณะรูปทรงโครงสร้างแต่ละแบบร่วมด้วย

(2) การออกแบบรูปทรงสถาปัตยกรรมให้อยู่ในลักษณะรูปทรงอินทรี ที่มีความโค้งอ่อนช้อย เส้นสายอิสระ เป็นธรรมชาติ สามารถทำได้ด้วยวิธีการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้างแนวเส้นตรง แนวเส้นโค้ง และแนวผสมผสาน ร่วมกับการจัดวางระบบที่ว่างในผังพื้น โดยการออกแบบที่ส่งผลต่อลักษณะความโค้งอ่อนช้อยหรือความพลิ้วไหวในรูปทรงหลังคา สามารถทำได้โดยออกแบบให้โครงเฟรมแต่ละโครงมีระยะความสูงที่แตกต่างกัน จากนั้นนำแต่ละโครงเฟรมมาจัดเรียงแนวเส้นตรง แนวเส้นโค้ง หรือแนวผสมผสาน ทั้งนี้ชนิดพันธุ์ไม้ที่ใช้ในระบบโครงสร้างหลังคาควรมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการตัด เนื้อเหนียว ไม่แตกหักง่าย อย่างเช่น ไม้รวกดำ ซึ่งมีค่า สมบัติในการหัก (Modulus of Rupture) อยู่ที่ 120 Mpa มากกว่าไม้ตง ไม้ซาง ไม้สีสุก

(3) ลักษณะการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง มีข้อค้นพบสำคัญที่นำไปสู่การเกิดลักษณะเฉพาะในระบบโครงสร้าง คือ การใช้ระบบค้ำยันหรือระบบยึดรั้งชิ้นส่วนโครงสร้างเข้าด้วยกัน (Bracing system) ทั้งการยึดรั้งในแนวตั้งระหว่างโครงเฟรมแต่ละตัว และการยึดรั้งในแนวนอนที่พบในโครงสร้างหลังคา ซึ่งลักษณะของระบบยึดรั้งชิ้นส่วนโครงสร้างนี้ เป็นผลมาจากการออกแบบเพื่อรับแรงกระทำด้านข้างโดยเฉพาะแรงลม ที่ทำให้ให้โครงสร้างเกิดการโยกตัวหรือเอนเอียง

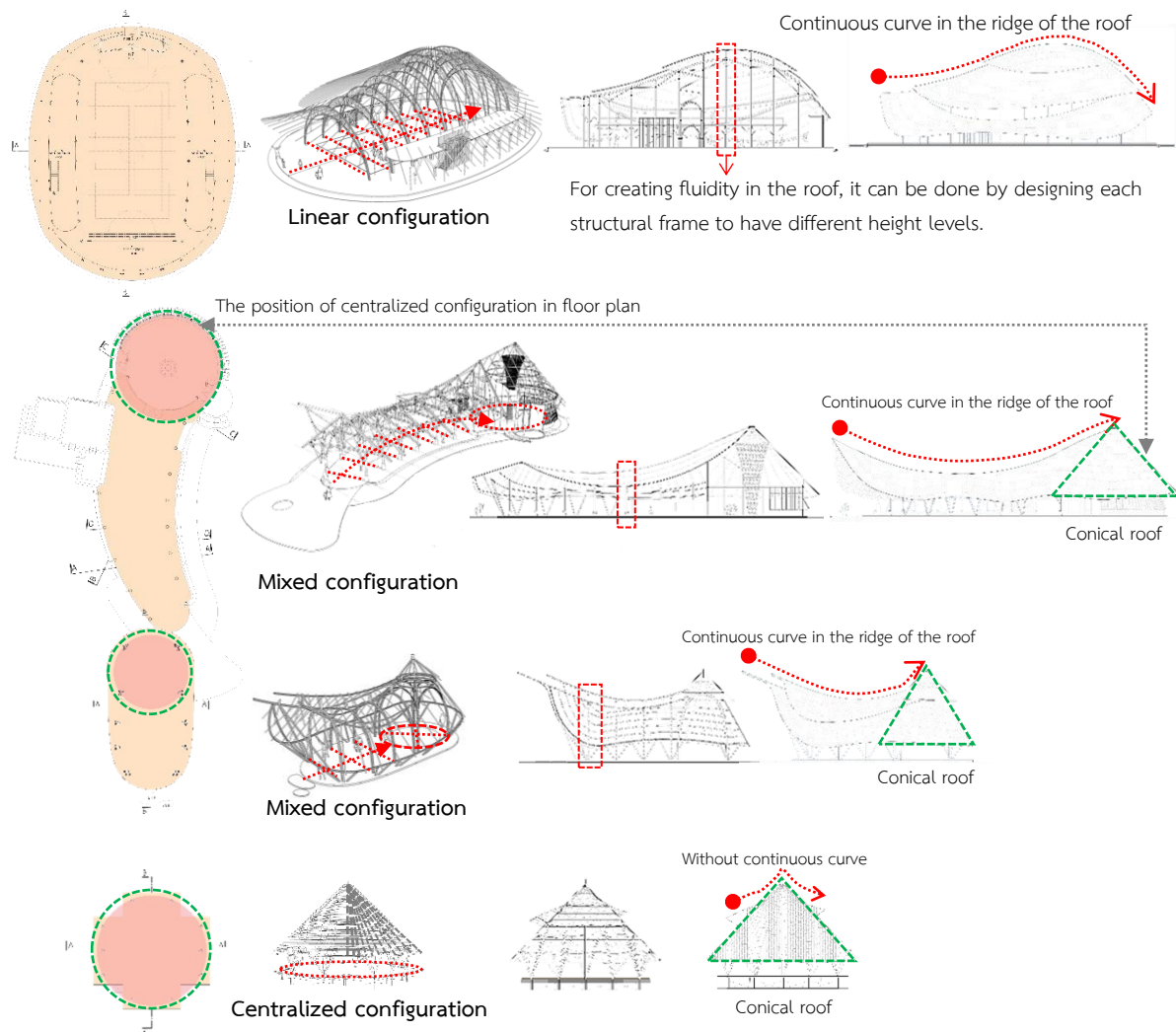
(4) การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองพฤติกรรมการรับแรงในโครงสร้างอย่างง่าย ทำให้ทราบถึงแรงกระทำที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้น (members) ส่งผลต่อการคำนวณปริมาณลำไม้ที่จะนำมาประกอบกันเป็นรูปทรงโครงสร้างในแต่ละลักษณะ โดยระบบโครงสร้างแบบโครงเฟรมจะมีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นที่ส่วนฐานของโครงเฟรมมากกว่าส่วนด้านบนของโครงเฟรม ซึ่งสามารถลดปริมาณลำไม้ในช่วงบนของโครงเฟรมลงได้ ในขณะที่ระบบโครงสร้างเสาแผ่รับน้ำหนักจะมีการรับแรงอัดมากกว่าโมเมนต์ดัด โดยชิ้นส่วนเสาหากเป็นการใช้ไม้ลำเดียวให้พิจารณาเลือกใช้ชนิดพันธุ์ไม้ที่มีหน้าตัดใหญ่ มีผนังลำไม้ที่หนาแน่นด้วย จะสามารถรับแรงอัดได้ดี อย่างเช่น ไม้ตง ซึ่งมีค่าความสามารถในการรับแรงอัด (Compressive strength) มากกว่าไม้ซาง ไม้สีสุก ไม้ป่า และไม้รวกดำ

7.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะของการศึกษานี้มี 2 ส่วน โดยส่วนแรก คือ จำนวนของอาคารกรณีศึกษา ซึ่งทำการศึกษากว่า 4 อาคาร อย่างไรก็ตามหากมีการเพิ่มจำนวนอาคาร ที่มาจากความหลากหลายของผู้ออกแบบและผู้ก่อสร้าง จะทำให้เกิดการอภิปรายในประเด็นต่าง ๆ ที่กว้างขวางมากยิ่งขึ้น เนื่องจากแต่ละบริษัทมีฐานแนวคิดในการทำงานที่ใช้วัสดุไม้ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป และส่วนที่สอง คือ การตั้งข้อสังเกตในประเด็นที่ว่าสถาปัตยกรรมรูปทรงอินทรีที่ให้ความรู้สึกพลิ้วไหว เส้นสายอ่อนช้อยเป็นธรรมชาตินั้น ถูกพัฒนามาจากการประกอบกันของรูปร่างเรขาคณิต ซึ่งในประเด็นนี้สามารถเปิดพื้นที่ในการตั้งคำถามในแง่มุมที่ว่า เป็นไปได้หรือไม่ที่สถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัยในลักษณะรูปทรงอินทรี จะเกิดจากการประกอบกันของรูปร่างโครงสร้างอื่น ๆ ที่ไม่ใช่การพัฒนาจากรูปร่างเรขาคณิตเพียงอย่างเดียว โดยคำถามนี้ถือเป็นข้อเสนอแนะต่อยอดการศึกษาสำหรับผู้สนใจในลำดับถัดไป

8. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์เรื่อง สถาปัตยกรรมไม้ร่วมสมัย ในประเทศไทย ปีการศึกษา 2566 หลักสูตร ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สนับสนุนโดยทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่สนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ของรูปทรงสถาปัตยกรรมและการจัดเรียงชิ้นส่วนโครงสร้าง ของอาคารกรณีศึกษา
Figure 20 The relationship between architectural form and structural configuration in case studies

เอกสารอ้างอิง

- Awalluddin, D., Ariffin, M. A. M., Osman, M. H., Hussin, M. W., Ismail, M. A., Lee, H. S., & Lim, N. H. A. S. (2017, August 22-25). *Mechanical properties of different bamboo species*. [Conference session]. The 6th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (Vol.138, p. 9), Hanyang University, Seoul, South Korea. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713801024>
- Chaowana, K., Wisadsatorn, S., & Chaowana, P. (2021). Bamboo as a sustainable building material-culm characteristics and properties. *Sustainability (Switzerland)*, 13(13), 7376. <https://doi.org/10.3390/su13137376>

- Chapirom, A. (2021). *Analysis and Design structure by SAP2000* (2nd ed.). Suranaree University of Technology.
- Crolla, K. (2017). Building indeterminacy modelling–the ‘ZCB bamboo pavilion’ as a case study on nonstandard construction from natural materials. *Visualization in Engineering*, 5(1), 1-12.
- Daram, S. (2019). The Analysis of Safety Factor for Bamboo used in Construction. *Journal of Architecture, Design and Construction*, 1(3), 1-23. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/Jadc/article/view/224751> (in Thai)
- Huang, Z. (2019). *Application of Bamboo in Building Envelope*. Springer.
- Inpuntung, V., Mruksirisuk, P., Amloy, A., Srisaowanunt, A., Lorchai, J. & Tadtong, P. (2020). *Thai Vernacular Architecture*. The Association of Siamese Architects under the Royal Patronage. (in Thai)
- International Bamboo and Rattan Organization (INBAR). (2015). *Preparation for the UN Summit for the Adoption of the Post-2015 Development Agenda (25-27 September)*. https://www.un.org/esa/forests/wp-content/uploads/2015/11/INBAR_input_AHEG2016.pdf
- Kumsingsree, R., & Rittironk, S. (2020). Types of Architectural Structure in Bamboo Architecture. *Journal of Asian urban environment*, 71-77. <https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R000000004-I031356164>
- Lara, R. & Espinosa, R. (2018). *Bamboo: alternative sustainable tourism for community development*. Liège: University of Liège Press.
- Liese, W. (1985, October 6-14). *Anatomy and Properties of Bamboo* [Conference session]. Proceedings of the International Bamboo Workshop, Hangzhou, People’s Republic of China.
- Liese, W., & Tang, T. K. H. (2015). Preservation and drying of bamboo. In W. Liese & M. Köhl (Eds.), *Bamboo: The plant and its uses* (pp. 257–297). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>
- Maurina, A., & Henatta, B. (2014, November 14-15). *Promoting sustainable living through contemporary bamboo architecture* [Paper presentation]. Proceeding International Conferences on 15th SENVAR (Sustainable Environmental Architecture) and 2nd AVAN (Asian Vernacular Architecture Network), Makassar, Indonesia
- Maurina, A., & Prastyatama, B. (2017). Bamboo Architectonic: Experimental Studies Using Bundled-Bamboo-Split (BBS). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 7(3), 850-857. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.3.2131>
- Minke, G. (2016). *Building with Bamboo: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Walter de Gruyter GmbH.
- Narmluk, M., & Makesan, P. (2013). Influence of Node, Cross-sectional size, and Moisture Content on Tensile Strength of Bamboo. *The Journal of Industrial Technology*, 9(2), 84-96. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jit_journal/article/view/16590 (in Thai)
- Nurdiah, E. A. (2016). The potential of bamboo as building material in organic shaped buildings. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 216, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.004>
- Punpairoj, P. (2011). Tai Dam’s Longing for Tortoise Shaped Houses: From the Highlands of Muang Thaeng to the River Basins of Thailand. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 8(1), 21-34. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/jars/article/view/168664> (in Thai)
- Royal Forest Department. (2005). *The Thai Hardwoods*. https://forprod.forest.go.th/forprod/forprod2017/Knowledgebase/default_woodindustry.php (in Thai)
- Sandaker, B. N. (2008). *On span and space: Exploring structures in architecture*. Routledge.
- Schodek D.L., & Bechthold, M. (2014). *Structures*. Pearson

- Sompoh, B., Fueangvivat, V., Baujongkol, P., & Ratcharoen, V. (2005). *Contribution to Forest Rehabilitation in Thailand's Areas Affected by the Tsunami Disaster: PD 372/05 Rev.1(F): Properties of bamboo for construction*. Forest Research and Development Office, Royal Forest Department, https://forprod.forest.go.th/forprod/forprod2017/Knowledgebase/default_ecowood.php (in Thai)
- Tam, M. (2018). *Bamboo for the 21st Century* [PowerPoint slides]. <https://www.slideshare.net/slideshow/martintambamboo-for-the-21st-century/122039768#73>
- Tiptus, P. (2002). *Fundamentals of composition in architecture*. Chulalongkorn University Press. (in Thai)
- UN Environment Programme. (2023). *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future* <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/43293>
- Vivas, L., S., Mullins, G., Cunningham, J., A., & Mihelcic, J., R. (2019). Mechanical properties of bamboo: a research synthesis of strength values and the factors influencing them. *The Journal of the American Bamboo Society*, 29, 1-21. https://bamboo.org/_uploads/pdfs/JABSv29_Sanchez_20191007.pdf
- Wirabuana, R. N., & Maurina, A. (2017). Impacts of long-span bamboo structure towards architectural-spatial experience. *MATEC Web of Conferences*, (101), 1-7. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710105024>
- Xu, H., Xu, B., & Wu., J. (2017, September 3-9). *The Research of Curve Element Used in Original Bamboo Architecture Design* [Paper presentation]. UIA 2007 Seoul World Architect Congress, Seoul, South Korea. https://www2.fag.edu.br/professores/solange/ANAIS%20UIA%202017%20SEOUL/papers/Full_paper/Paper/Poster/P-0651.pdf
- Yin, K. R. (2018). *Case Study Research and Applications Design and Methods*. Sage