

การประยุกต์ใช้ไม้ไผ่กับผ้าใบรับแรงดึง The Application of Bamboo with Tensioned Membrane

ธัชพงศ์ ศรีสุวรรณ¹
อาจารย์ประจำสาขาวิชาสถาปัตยกรรม
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

โครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง จัดได้ว่าเป็นหนึ่งในโครงสร้างที่เก่าแก่ที่สุด ที่มนุษย์รู้จักและยังคงถูกพัฒนาใช้มาจนถึงปัจจุบัน ผ้าใบถือว่าเป็นส่วนสำคัญในโครงสร้าง ไม่น้อยไปกว่าโครงสร้างหลัก โดยทำหน้าที่เป็นทั้งโครงสร้างรอง และเปลือกห่อหุ้มองค์อาคาร ซึ่งมีส่วนช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้าง ลดงบประมาณในการก่อสร้าง และยังลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการก่อสร้างด้วย อย่างไรก็ตาม สำหรับประเทศไทยแล้ว โครงสร้างประเภทนี้ยังต้องใช้งบประมาณค่อนข้างสูงในการก่อสร้าง เนื่องจากใช้เหล็กเป็นวัสดุโครงสร้างหลัก

ไม้ไผ่ เป็นพืชที่พบได้ทุกภาคในประเทศไทย และนิยมใช้ในงานก่อสร้างอย่างกว้างขวางและยาวนาน เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ทั้งในด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่นและมีน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่น เช่น เหล็ก คอนกรีต และไม้ นอกจากนี้ ด้วยลักษณะโครงสร้างแบบปล้อง (Tube Structure) ทำให้ไม้ไผ่สามารถรับแรงได้ดีทั้งแรงดึง และแรงอัด ดังนั้น จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ จึงมีเพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ไม้ไผ่กับโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง เมื่อถูกก่อสร้างในสภาพการใช้งานจริง

โครงสร้างผ้าใบรับแรงดึงที่สร้างเป็นกรณีศึกษา มีขนาดพื้นที่ประมาณ 36 ตารางเมตร โดยมีรูปทรงเป็นลักษณะอานม้า ประกอบด้วยจุดดึงสูง 3 จุด และจุดดึงต่ำ 3 จุด โดยโครงสร้างจะถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ixForten 4000 ซึ่งจะจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างในสภาวะที่ถูกแรงกระทำต่างๆ กัน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์จะถูกใช้ในการออกแบบรอยตัดผ้าใบ การผลิต ตลอดจนการติดตั้งในสถานที่จริง

คำสำคัญ: ผ้าใบรับแรงดึงสูง ไม้ไผ่ โครงสร้างเบา ixForten4000

Abstract

The membrane structure is one of the oldest architectural innovations which is still useful in the modern world. The fabric membrane acts as both structure and enclosure, thereby reducing the weight, cost and environmental impact of the construction. However, the construction cost of such structures is relatively high due to the use of steel as primary structure. Bamboo, which is widely used as a building material in Thailand and tropical countries, has many advantages compared to steel, concrete and woods in its strength, elasticity and lightness. An organic round tube structure is also good for tensile and press loadings. Hence, the purpose of this research is to study the application of bamboo material as primary structure with tensioned membrane in real situation.

¹ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมและการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

The membrane roof has an area of about 36 sq.m. with 3 high points and 3 low points. Numerical models were simulated and analyzed in ixForten4000, then several load cases were verified. Finally, patterning, manufacturing, erection and assembly process were produced and illustrated.

Keywords: Tensioned Membrane Structure Bamboo Lightweight Structure ixForten4000

1. ที่มาและความสำคัญ

โครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง (Membrane Structure) จัดได้ว่าเป็นเทคโนโลยีค่อนข้างใหม่ในประเทศไทย ด้วยรูปลักษณะภายนอกที่แปลกตาไปจากโครงสร้างประเภท เสา-คาน ที่เราสัมผัสได้ในชีวิตประจำวัน หลายคนอาจเข้าใจว่าเป็นโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นใหม่ ต้องใช้เทคโนโลยีระดับสูง ลงทุนจำนวนมาก และอาจไม่คงทนถาวร แต่ในความเป็นจริง โครงสร้างประเภทผ้าใบรับแรงดึงสูง ได้ถูกพัฒนาในต่างประเทศมานานกว่า 50 ปีแล้ว และถ้ามองย้อนกลับไปในประวัติศาสตร์ จะพบว่าโครงสร้างประเภทนี้ มีความเก่าแก่พอๆ กันกับอารยธรรมมนุษย์เลยก็ได้ เช่น การใช้ผืนหนังสัตว์มาขึงกับโครงไม้สำหรับพักอาศัย หรือในสมัยโรมัน ก็มีการพบหลักฐานที่บ่งว่ามีการใช้โครงหลังคาผ้าใบคลุมเหนือพื้นที่ของสนามแข่งขันโคลอสเซียม ซึ่งครอบคลุมพื้นที่กว่า 23,000 ตารางเมตร²



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) German Pavilion of Expo² 67, Montreal, USA

ที่มา: http://expo67.ncf.ca/german_nae000990939.jpg

(ข) Olympic Stadium, München, Germany

ที่มา: http://www.bigfoto.com/sites/gallery/munich/olympia_park.jpg

ภายหลังเมื่อมีการพัฒนาการใช้หิน และคอนกรีตขึ้น โครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง ก็เริ่มลดบทบาทลงจนเกือบจะหายไป จนกระทั่งหลังสงครามครั้งที่สอง ได้มีการนำโครงสร้างรับแรงดึง (Tensile Structures) มาใช้ในงานวิศวกรรม และสถาปัตยกรรมอีกครั้ง อันเป็นผลมาจากความเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า หลังจากนั้นโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึงสูง ได้ถูกนำมาใช้ในสถาปัตยกรรมโดยเฉพาะอาคารที่มีช่วงกว้างมากๆ อย่างแพร่หลาย เช่น อาคาร German Pavilion (1967) (รูปที่ 1 ก) และสนามกีฬาโอลิมปิกแห่งเมืองมิวนิก (1972) (รูปที่ 1 ข) เป็นต้น

นับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา โครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง ก็ได้เริ่มแพร่กระจายและได้รับความนิยมไปทั่วโลก โดยเฉพาะกับอาคารที่ต้องการโครงสร้างช่วงพาดกว้าง นอกจากลักษณะเฉพาะตัวของผ้าใบที่มีความยืดหยุ่น และสวยงามในตัวเองแล้วยังแสดงออกซึ่งความทันสมัย และสัจจะของโครงสร้าง ดังเห็นได้จากการนำเอาลักษณะดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับอาคารที่ต้องการ

² Graefe, Rainer: Vela Erunt. "Die Zeltmacher der römischen Theater und ähnlicher Anlagen". Mainz, 1979.

ภาพลักษณะทันสมัยหลายแห่งในประเทศไทย เช่น อาคารโถงผู้โดยสารสนามบินสุวรรณภูมิ (รูปที่ 2 ก) และอาคารดิจิทัล เกทเวย์ (รูปที่ 2 ข) เป็นต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 (ก) อาคารโถงผู้โดยสาร สนามบินสุวรรณภูมิ

ที่มา: http://www.earchitct.co.uk/images/jpgs/thailand/suvarnabhumi_airport_mj150508_rainerviertlbock09.jpg

(ข) โถงภายในอาคารดิจิทัล เกทเวย์

ที่มา: http://s98.photobucket.com/user/mosaic_tu/media/2009-09-03/SDC10501.jpg.html

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง จะให้ข้อดีในแง่ของประสิทธิภาพเชิงโครงสร้าง แต่สำหรับบริบทของประเทศไทย ยังถือว่าต้องใช้งบประมาณค่อนข้างสูงในการก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจาก วัสดุที่ต้องใช้นอกจากจะมีผ้าใบแล้ว (ซึ่งต้องนำเข้าจากประเทศผู้ผลิต) ยังประกอบด้วยโครงสร้างเหล็ก เป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Structure) สำหรับรับแรงอัด ซึ่งเหล็กในประเทศไทยยังมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น อีกทั้งยังใช้พลังงานในการแปรรูปมากกว่าวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น³ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานที่ใช้ในการแปรรูป และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแต่ละชนิด

วัสดุ	ค่าพลังงานในการแปรรูป	ความหนาแน่น	Working stress	Working strain	Modulus (E)
	MJ/kg		(σ) N/mm ²	(ϵ) in 10 ⁻⁶	
คอนกรีต	0.80	2,400	8	300	25,000
เหล็ก	30.00	7,800	160	800	210,000
ไม้	1.00	600	7.5	700	11,000
ไม้ไผ่	0.57	600	107	500	20,000

ที่มา: Janssen, J. J.A., Technical University of Eindhoven. 1981.

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีไม้ไผ่เป็นจำนวนมาก หลากหลายสายพันธุ์ และคนไทยก็รู้จักนำไม้ไผ่มาใช้ประโยชน์ ทั้งอุปโภคและบริโภคมาเป็นเวลาช้านานแล้ว หากพิจารณาจากตารางที่ 1 จะพบว่า วัสดุประเภทไม้ไผ่นั้น มีความสามารถไม่แพ้เหล็ก ซึ่งหากเลือกหน้าตัดที่เหมาะสมแล้ว อาจมีความสามารถรับแรงในแนวแกนได้มากกว่าไม้ หรือเทียบเท่าเหล็ก⁴

³ Janssen, J. J.A., Technical University of Eindhoven. 1981.

⁴ T.M. Obermann, R. Laude. "Bamboo Poles for Spatial and Light Structures". Technische Universitat Berlin, Germany, 2004.

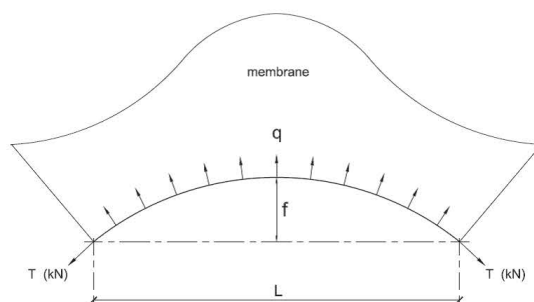
นอกจากนี้ ไม้ไผ่ยังมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากไม้ชนิดอื่น คือ เมื่อแห้งแล้ว การขยายหรือหดตัวมีน้อยมาก เป็นพื้นที่เติบโตได้อย่างรวดเร็ว สามารถปลูกทดแทนได้ง่าย และมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับไม้หรือเหล็ก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ หากนำไม้ไผ่มาประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง ซึ่งจะเป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบที่มีลักษณะเฉพาะตัว ได้รู้ลักษณะของความเป็นสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น และในขณะเดียวกันก็ช่วยลดงบประมาณในการก่อสร้าง รวมถึงลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต

2. การศึกษาทฤษฎีและวิธีการวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้ เป็นการประยุกต์โครงสร้าง 2 ประเภท ซึ่งได้แก่โครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง และโครงสร้างไม้ไผ่มาใช้งานร่วมกัน ซึ่งโครงสร้างทั้งสองประเภทนี้มีคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยไม้ไผ่จะทำหน้าที่เป็น โครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Structure) รับแรงดึงและแรงอัด ส่วนผ้าใบ จะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Structure) รับแรงดึง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงลักษณะและพฤติกรรมของโครงสร้างทั้ง 2 ประเภท

2.1 โครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง

รูปทรงและพฤติกรรมของโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง แตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับโครงสร้างอาคารทั่วไป ที่มักใช้เป็นพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear Structure) ในขณะที่โครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง เป็นโครงสร้างที่ไม่เชิงเส้น (Non-Linear Structure) โดยใช้ความเค้น (Stress) บนพื้นผิว ในการที่จะคงรูปตัวเอง และรองรับแรงกระทำจากภายนอก โดยวิธีการให้แรงบนพื้นผิวผ้าใบ (Pre-Stress) มีความแตกต่างกันไปในแต่ละรูปแบบของโครงสร้าง เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำบนพื้นผิวผ้าใบ (Membrane) ผ้าใบก็จะถ่ายผ่านแรงไปยังเคเบิล และโครงสร้างปฐมภูมิ ตามลำดับ ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นใน Boundary Cable สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 1



$$T = q \times r$$

สมการที่ 1

T = แรงดึงในเส้นเคเบิล (kN)

q = แรงกระทำบนผิวผ้าใบกับเคเบิล (kN/m)

r = รัศมีความโค้งของเคเบิล (m) สามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$r = \frac{L^2}{8f} + \frac{f}{2}$$

สมการที่ 2

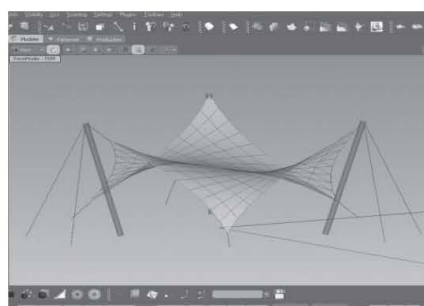
f = ระยะหย่อนตัวของเคเบิลจากแนวระดับ (m)

L = ระยะพาดระหว่างจุดยึดตติง (m)

การจะได้มาซึ่งรูปทรงของโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึงนั้น ไม่ได้เกิดจากการที่ผู้ออกแบบ “ต้องการให้เป็น” หากแต่เกิดจากกระบวนการหาฐานของรูปทรง (Form Finding Process) ที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ เพื่อสร้างสภาวะสมดุล เมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำ ตัวอย่างเช่น ฟิล์มสบู่ (Soap Film) การห้อยตัวของเส้นเชือก (Rope Chain) เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์หาฐานรูปทรง สามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ การสร้างแบบจำลองกายภาพ (Physical Model) และการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Computational Model)



(ก)



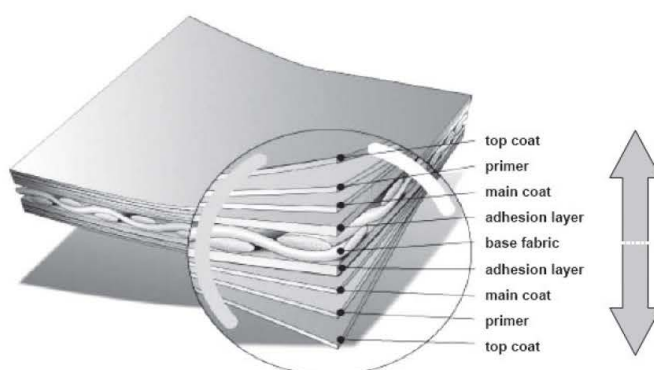
(ข)

รูปที่ 3 (ก) การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ

(ข) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ที่มา: ฟูวิชัย. 2557

วัสดุผ้าใบรับแรงดึง (Membrane) นับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งสำหรับโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง ด้วยน้ำหนักที่เบามาก เมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น ทำให้สามารถพาดช่วงได้กว้างมาก โดยไม่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างขนาดใหญ่รองรับ แต่ด้วยคุณสมบัติที่มีความยืดหยุ่นสูง (Elastic) ทำให้ไม่สามารถรับแรงอัดหรือแรงดัดใดๆ ได้ โดยวัสดุผ้าใบรับแรงดึง จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อผ้าใบ (Fabric) และส่วนที่เป็นสารเคลือบผิว (Coating) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผ้าใบและสารเคลือบผิวผ้าใบ

ที่มา: Mehler Texnologies, Hückelhoven, Germany. 2009.

สารเคลือบผิว (Coating) ของผ้าใบนั้น มีหน้าที่ป้องกันเนื้อผ้าใบจากสิ่งต่างๆ ที่อาจทำลายเนื้อผ้าใบ เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ความชื้น หรือเชื้อรา เป็นต้น และยังเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเชื่อมต่ผ้าใบ (Welding) เข้าด้วยกัน โดยสารเคลือบผิวผ้าใบนั้น มีหลายชนิด และมักเรียกชื่อผ้าใบตามสารที่ใช้เคลือบผิว เช่น PVC-Coated Polyester Fabric, PTFE-Coated Glass-Fiber Fabric เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุผ้าใบแต่ละประเภทนั้น จะแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2

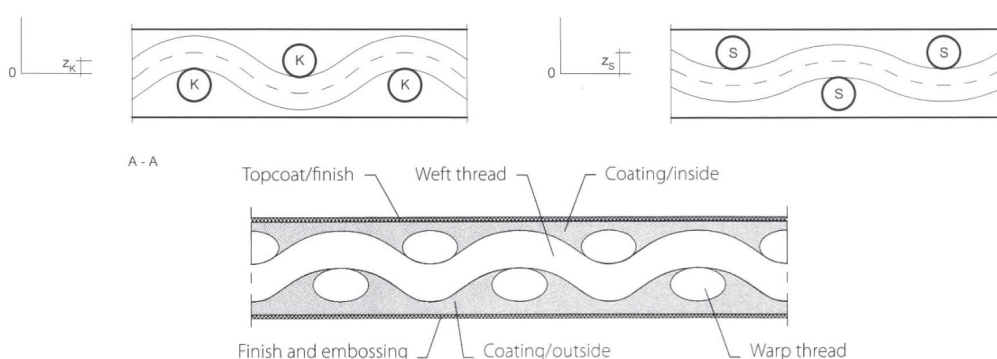
ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุผ้าใบรับแรงดึงประเภทต่างๆ

Fabric / Coating	weight	Tensile strength (warp/weft)	Tensile strain (warp/weft)	Tear strength
	g/m ²	N/50 mm	%	N
Cotton-Polyester/-	350	1,700/1,000	35/18	60
	520	2,500/2,000	38/20	80
Polyester / PVC				
Type I	750	3,000/2,800	15/20	300/280
Type II	1,050	4,200/4,000	15/20	550/500
Type III	1,050	5,600/5,600	15/25	800/650
Type IV	1,350	8,000/7,000	15/30	1,200/1,100
Type V	1,500	10,000/8,000	20/30	1,600/1,400
Fiberglass / PTFE	800	3,500/3,000	7/10	300
	1,270	6,600/6,000	7/10	570
Fiberglass / Si	350	2,000/2,000	-	-
	1,156	5,000/5,000	-	-

ที่มา: Houtman, R. "There is No Material Like Membrane Material". Tensinet Symposium. 2003. (ดัดแปลง)

ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของผ้าใบอีกประการหนึ่งคือ ทิศทางของเส้นใย (Thread) ที่ถักทอประสานกันขึ้นมาเป็นเนื้อผ้าใบ (fabric) ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองทิศทาง คือ เส้นใยในทิศทางยืน (Warp Direction) และทิศทางประสาน (Weft or Fill Direction) ซึ่งหากพิจารณารูปตัดขยายของผ้าใบ (รูปที่ 5) จะพบว่า เส้นใยในทิศทางยืนจะค่อนข้างเหยียดตรง มากกว่าเส้นใยในทิศทางประสาน เป็นผลให้ เส้นใยในทิศทางยืน มีค่าความแข็งตึง (Stiffness) มากกว่าเส้นใยในทิศทางประสาน⁵

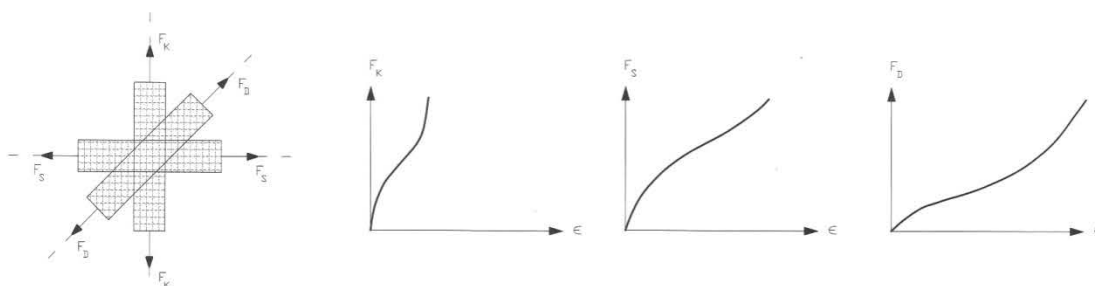
เนื่องด้วยการสอดประสานของเส้นใยในทิศทางที่แตกต่างกันนี้ ทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแต่ละทิศทางแตกต่างกันด้วย (รูปที่ 6) ซึ่งเป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของวัสดุประเภท Anisotropic Material



รูปที่ 5 รูปตัดของผ้าใบแสดงการวางตัวของเส้นใยในแนวยืน (warp, K) และแนวประสาน (weft, S)

ที่มา: Seidel. 2008

⁵ A. Ambroziak, P. Klosowski. "On Construction Solutions for Tensile Structures". Lightweight Structures in Civil Engineering. Warsaw, 2006.

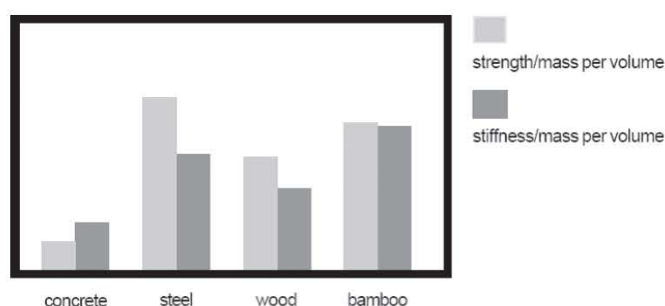


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมของผ้าใบกับทิศทางในการรับแรงกระทำ
ที่มา: Seidel, 2008

2.2 โครงสร้างไม้ไผ่

สาเหตุหนึ่งที่เลือกไม้ไผ่ มาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศไทย และราคาไม่สูง ซึ่งน่าจะมีส่วนช่วยในการลดงบประมาณในการก่อสร้างได้ไม่มากนัก โดยไม้ไผ่ที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างมากที่สุดคือ ไผ่ตง (ชื่อสามัญ: Rough Giant Bamboo ชื่อวิทยาศาสตร์: *Dendrocalamus asper* Backer) เนื่องจากมีขนาดใหญ่และมีคุณสมบัติที่ดีในการรับแรง ซึ่งประสิทธิภาพทางโครงสร้างของวัสดุใดๆ นั้นสามารถพิจารณาได้จาก ความแข็งแรง (Strength) และความแข็งตึง (Stiffness) ดังแสดงในรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 จะพบว่าอัตราส่วนความแข็งแรงต่อปริมาตร และความแข็งตึงต่อปริมาตรของไม้ไผ่มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพทางโครงสร้าง (Structural Efficiency) ของไม้ไผ่มีสูงมาก หากเทียบในปริมาณน้ำหนักที่เท่ากัน นอกจากนี้ คุณสมบัติที่โดดเด่นอีกประการหนึ่งของไม้ไผ่คือ น้ำหนักเบามาก เมื่อเทียบกับวัสดุโครงสร้างอื่น โดยความหนาแน่นเฉลี่ย อยู่ที่ 700 kg/m^3 ในขณะที่เหล็กมีความหนาแน่นสูงถึง $7,850 \text{ kg/m}^3$ หรือ 12 เท่าของไม้ไผ่ ซึ่งหากเทียบในกรณีที่ความยาวและน้ำหนักเท่ากัน ไม้ไผ่สามารถต้านแรงกระทำได้มากกว่าไม้ และใกล้เคียงกับเหล็ก⁶



รูปที่ 7 เปรียบเทียบความแข็งแรงและความแข็งตึงต่อความหนาแน่นของวัสดุชนิดต่างๆ
ที่มา: Jassen, 2000.

อย่างไรก็ตาม ไม้ไผ่แต่ละชนิดย่อมมีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันออกไป โดยจากการศึกษาของ Zhou⁷ พบว่า ไม้ไผ่ที่อายุประมาณ 4-5 ปี จะมีความแข็งแรง (Strength) สูงที่สุด แต่หากอายุต่ำกว่านั้น หรือมากกว่า 10 ปีขึ้นไป จะมีคุณภาพที่ต่ำลง และการตัดไม้ไผ่มาทำโครงสร้าง ควรกระทำในช่วงฤดูอากาศแล้ง เพื่อที่จะได้ไม้มีความชื้นสะสมอยู่ในเนื้อ

⁶ IL 31. "Bamboo as a Building Material". (The BIC-factor, p.278). Germany. 1985.

⁷ Zhou, F.C. "Studies on Physical and Mechanical Properties of Bamboo Woods". Journal of Nanjing Techn. Coll.For.Prod. 1981. Vol.2. p. 54-69

ไม้ไผ่มากเกินไป สำหรับในประเทศไทย ได้มีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ตง และไม้ชางนวล⁸ โดยสามารถนำมาเปรียบเทียบกับไม้ไผ่โคลัมเบีย ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่โคลัมเบีย ไม้ตง และไม้ชางนวล

ชนิดไม้ไผ่	Compression Strength (σ)	Bending Strength	E Modulus	Shearing Strength	Tensile Strength
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
ไม้โคลัมเบีย	56	74	19,000	9	140
ไม้ตง	33	68	40,558	10.36	-
ไม้ชางนวล	47.28	78.91	33,240	15.28	-

สถาปนิกและนักออกแบบหลายคน ได้ศึกษาค้นคว้าถึงความเป็นไปได้ที่จะนำไม้ไผ่มาประยุกต์ใช้ในงานออกแบบ และก่อสร้างอาคาร โดยเฉพาะการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ เนื่องจากไม้ไผ่มีคุณสมบัติเชิงโครงสร้างสูงกว่าไม้ และยังเป็นพืชที่ปลูกง่าย เติบโตได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาเพียง 3-4 ปี ก็สามารถนำมาใช้งานได้ ในขณะที่ไม้ ต้องใช้เวลาถึง 50 ปี⁹

ด้วยคุณสมบัติที่แข็งแรง ยืดหยุ่น และมีน้ำหนักเบาของไม้ไผ่ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างเบา (Lightweight Structure) ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลายในสถาบันต่างๆ เช่นที่ Institute for Lightweight Structures (IL) แห่งเมืองสตัทท์การ์ต (Stuttgart) ประเทศเยอรมนี เป็นสถาบันแรกที่นำร่องศึกษาการนำเอาไม้ไผ่มาใช้กับโครงสร้างเบา หรือในงานวิจัยของ Bernd Baier แห่งสถาบันการศึกษาชั้นสูง เมืองอาร์เคิน (FH Aachen) ซึ่งได้ศึกษาการนำไม้ไผ่มาใช้กับโครงสร้าง Grid Shell เพื่อใช้เป็นโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว เป็นต้น นอกจากนี้ ไม้ไผ่ยังถูกนำไปใช้ในงานออกแบบอาคารทั้งขนาดเล็ก และขนาดใหญ่หลายแห่ง เช่น อาคารโถงผู้โดยสาร ที่สนามบินบารากาส กรุงมาดริด ประเทศสเปน (รูปที่ 8 ก) และอาคารรับรอง โซเนวา คีรี รีสอร์ท ประเทศไทย (รูปที่ 8 ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 (ก) อาคารโถงผู้โดยสาร สนามบินบารากาส ประเทศสเปน

ที่มา: <https://www.flickr.com/photos/dalbera/4685194730>

(ข) อาคารรับรอง โซเนวา คีรี รีสอร์ท ประเทศไทย

ที่มา: <https://cdn.kiwicollection.com/media/property/PR006593/xl/006593-11-the-den.jpg>

⁸ วรุฒม์ ไฉนเวทย์ศิริกุล และภัทร ลีลาธรรม. "การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ตงและชางนวล". โครงการงานวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2546.

⁹ Xiaobing Yu. "Bamboo: Structure and Culture". Fachbereich Kunst und Design. Universität Duisburg-Essen. Germany. 2007.

3. ขั้นตอนและกระบวนการออกแบบผ้าใบรับแรงดึง

กระบวนการออกแบบโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักคือ

1. ขั้นตอนการพัฒนาแนวคิดการออกแบบ และหารูปทรงพื้นฐาน (Concept and Form Finding)
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural Analysis)
3. ขั้นตอนการผลิตผ้าใบ และออกแบบรายละเอียดจุดเชื่อมต่อ (Cutting Pattern and Detailing)
4. ขั้นตอนการก่อสร้าง (Erection)

ซึ่งในแต่ละขั้นตอนหลัก ยังประกอบด้วยขั้นตอนย่อยอีกหลายขั้นตอน ดังแสดงในแผนภาพที่ 9

4. วิธีการดำเนินการ และเครื่องมือในการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อประยุกต์โครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง กับ วัสดุไม้ไผ่ซึ่งใช้แทนโครงสร้างรับแรงอัด โดยสร้างเป็นองค์อาคารคลุมพื้นที่ใช้สอยสำหรับนักศึกษาทำกิจกรรม บริเวณลานกิจกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.1 ออกแบบส่วนของโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึง กับ วัสดุไม้ไผ่ สำหรับคลุมลานกิจกรรมนักศึกษา ภายใต้ชื่อโครงการ ปลากระเบน (Stingray Project)

4.2 วิเคราะห์รูปทรงพื้นฐาน (Form Finding) จนได้รูปทรงที่เหมาะสม โดยการสร้างแบบจำลองทางกายภาพ และการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

4.3 วิเคราะห์โครงสร้างที่เหมาะสม โดยสร้างกรณีศึกษาน้ำหนักบรรทุกในสถานะที่แตกต่างกัน (Load Case) เพื่อนำไปสู่การเลือกวัสดุที่เหมาะสม เช่น ขนาดไม้ไผ่ ชนิดผ้าใบ ขนาดของเคเบิล และจุดเชื่อมต่อต่างๆ

4.4 วางรูปแบบการตัดผืนผ้าใบ (Cutting Pattern) ที่เหมาะสมกับรูปทรงและแรงกระทำที่เกิดขึ้น

4.5 ออกแบบรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อต่างๆ (Detail Connection Design)

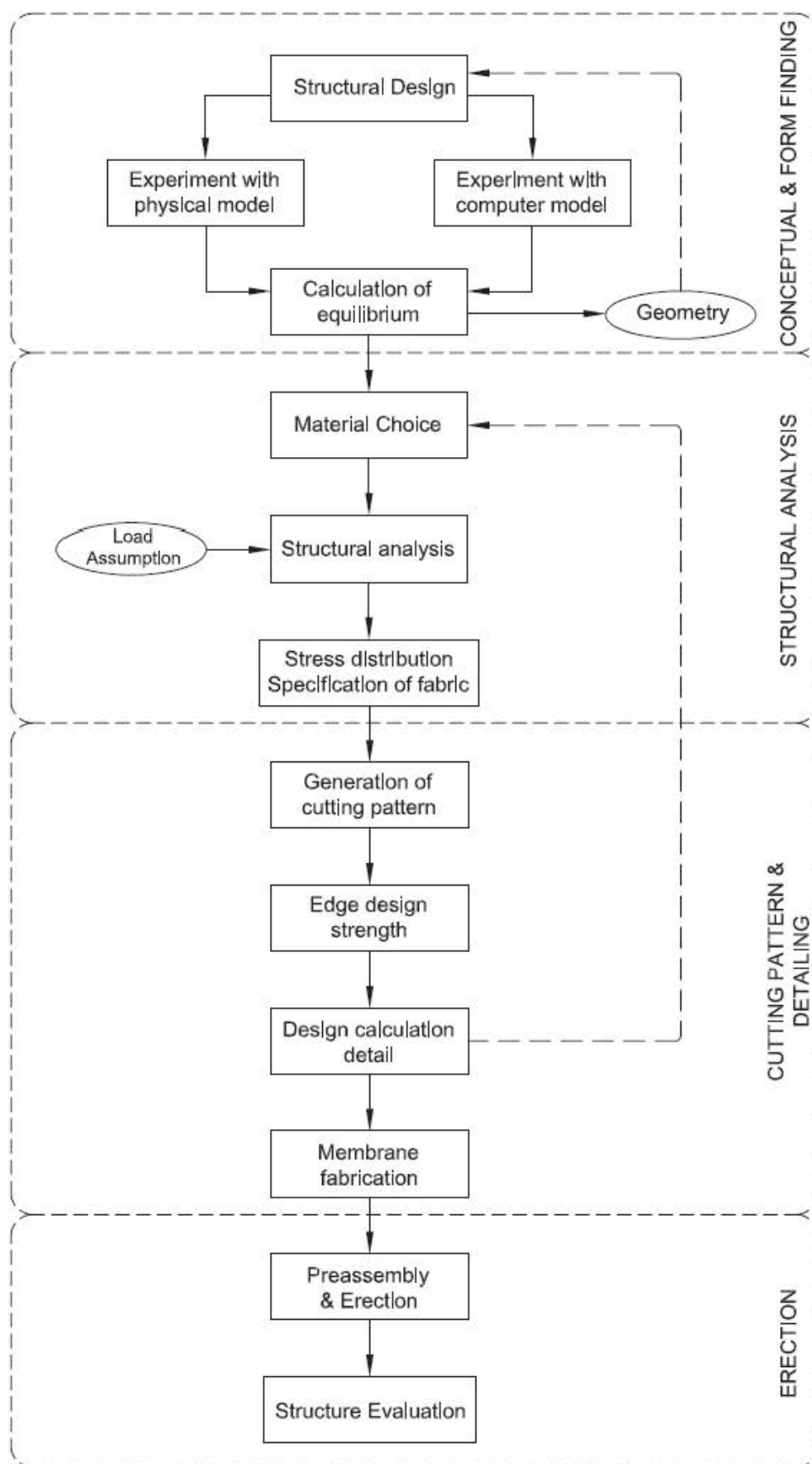
4.6 ดำเนินการสั่งผลิต-ประกอบผืนผ้าใบจากบริษัทผู้ผลิต (Membrane Fabrication)

4.7 จัดหาและคัดเลือกขนาดไม้ไผ่ที่เหมาะสม ตลอดจนออกแบบจุดเชื่อมต่อยึดตำแหน่งต่างๆ บนไม้ไผ่ โดยอ้างอิงจากผลการวิเคราะห์โครงสร้าง

4.8 ดำเนินการก่อสร้างจริง (Erection)

4.9 ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจริง สรุปผลและข้อเสนอแนะ

โดยในขั้นตอนวิเคราะห์รูปทรงพื้นฐาน (Form Finding) และวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural Analysis) จะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ixForten 4000 และสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D-Simulation) ด้วยโปรแกรม Rhinomembrane 1.2.2



รูปที่ 9 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึงสูง

5. การวิเคราะห์โครงสร้าง

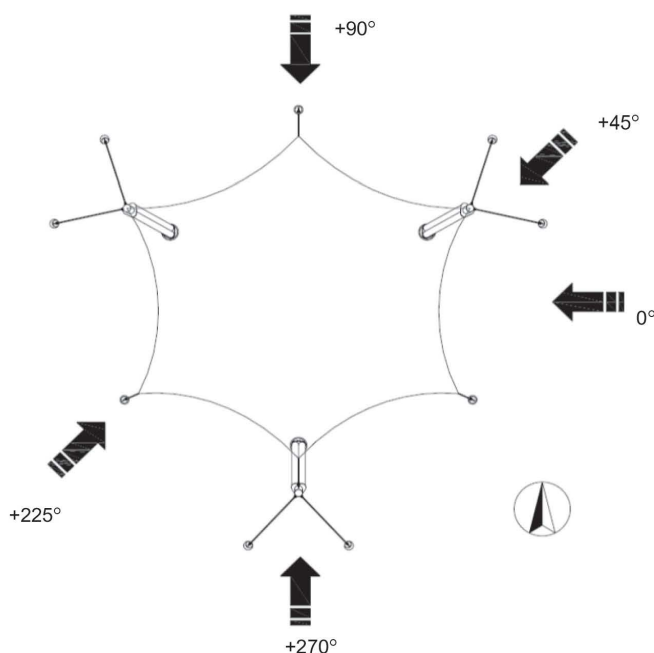
เมื่อรูปทรงสถฐาน (Form Finding) ขององค์อาคารที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางกายภาพ และแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนต่อไป คือ กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำในสภาวะต่างๆ โดยใช้โปรแกรม ixForten 4000 โดยอาศัยหลักการ Force Density Method (FDM) ซึ่งนอกจาก จะใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างไม่เชิงเส้น (Non Linear Analysis) เช่น เคเบิล และผ้าใบรับแรงดึงแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์โครงสร้างหลัก เช่น โครงสร้างเหล็ก ไม้ หรือคอนกรีต ได้ด้วย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบส่วนต่างๆ เช่น การเลือกผืนผ้าใบ การเลือกขนาดไม้ไผ่ การออกแบบจุดเชื่อมต่อยึดต่างๆ ขององค์อาคาร เป็นต้น

5.1 น้ำหนักกระทำ (Loads)

น้ำหนักกระทำที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สำหรับโปรเจกนี้ ได้แก่ แรง Pre-Stress แรงลม (Wind Load) น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) และน้ำหนักของผืนผ้าใบ (Self Weight)

1. แรง Pre-Stress เป็นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหารูปทรงสถฐาน (Form Finding Process) นอกจากจะทำให้โครงสร้างผ้าใบคงตัวอยู่ได้แล้ว ยังต้องสามารถต้านทานแรงกระทำที่เกิดขึ้นได้ในทุกสภาวะด้วย ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับวัสดุประเภท PVC Coated Polyester Membrane ขนาดของแรง Pre-Stress จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.3 ของค่าเฉลี่ยการรับแรงดึงของวัสดุ (Average Tensile Capacity)¹⁰ ทั้งทิศทางยื่น และทิศทางประสาน

2. แรงลม (Wind Load) วิเคราะห์โดยพิจารณาจากมาตรฐานการคำนวณแรงลม และการตอบสนองของอาคาร มยพ.1311-50 โดยใช้ความเร็วลมอ้างอิง ($\bar{V}$) เป็น 25 เมตรต่อวินาที จะได้ค่าหน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า เป็น 0.43 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร โดยกำหนดทิศทางลมไว้ 5 ทิศทาง คือ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ และทิศตะวันตกเฉียงใต้ ดังแสดงตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 การกำหนดทิศทางลมที่กระทำต่อองค์อาคาร

¹⁰ Mollaert, M. And Foster, B. "European Design Guide for Tensile Surface Structures". Tensinet, 2004.

3. น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ยึดถือตามข้อกำหนดของพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 หรือ ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร ว่าด้วยเรื่องควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544 ในส่วนของหลังคา กำหนดน้ำหนักบรรทุกจรขึ้นต่ำไว้ที่ 30 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

4. น้ำหนักของผืนผ้าใบ (Self Weight) น้ำหนักของวัสดุประเภท PVC Coated Polyester Membrane กำหนดไว้ที่ 0.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

แรงกระทำทั้งหมด จะถูกนำมาวิเคราะห์ในสภาวะต่างๆ กัน ทั้งในสภาวะจำกัดด้านการใช้งาน (Serviceability Limit State; SLS) และสภาวะจำกัดด้านกำลัง (Ultimate Limit State; ULS) ดังตารางที่ 4

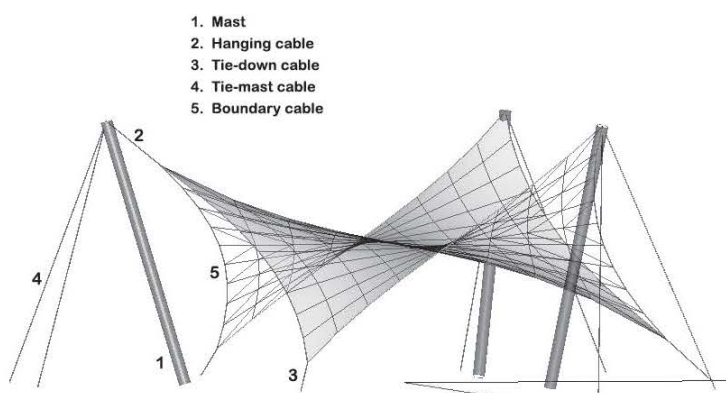
ตารางที่ 4 การออกแบบโดยวิธีสภาวะจำกัดด้านการใช้งาน และสภาวะจำกัดด้านกำลัง

สภาวะจำกัดด้านการใช้งาน (Serviceability limit state)		
รูปแบบที่ 1	SLS-01	1.0DL
รูปแบบที่ 2	SLS-02	1.0DL + 1.0LL
รูปแบบที่ 3	SLS-03	1.0DL + 1.0WL
รูปแบบที่ 4	SLS-04	1.0DL + 1.0LL + 1.0WL
สภาวะจำกัดด้านกำลัง (Ultimate limit state)		
รูปแบบที่ 1	ULS-01	1.35DL
รูปแบบที่ 2	ULS-02	1.35DL + 1.50LL
รูปแบบที่ 3	ULS-03	1.35DL + 1.50WL
รูปแบบที่ 4	ULS-04	1.35DL + 1.35LL + 1.35WL

DL = Dead load (self weight), LL = Live load, WL = Wind load

5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

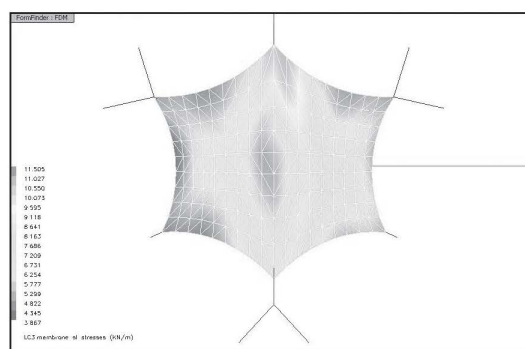
เมื่อร่างตำแหน่งของโครงสร้าง และใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วประมวลผลด้วยโปรแกรม ixForten 4000 เพื่อหารูปทรงพื้นฐาน สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 11



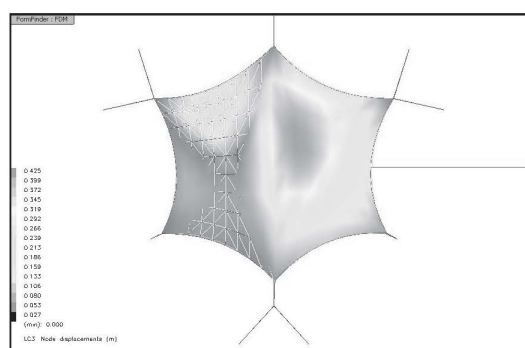
รูปที่ 11 การวิเคราะห์รูปทรงพื้นฐาน (Form Finding) ขององค์อาคาร

Code	Element	Max.Stress (kN)
ME-001	Membrane	+0.948
M-409	Mast	-15.00
HC-003	Hanging cable	+9.12
TD-000	Tie-down cable	+9.99
TM-416	Tie-mast cable	+4.67
BC-005	Boundary cable	+5.05

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้าง เมื่อถูกแรงกระทำในสภาวะต่างๆ (ตามตารางที่ 4) พบว่า แรงเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้าง เมื่อออกแบบโดยวิธีสภาวะจำกัดด้านกำลัง (Ultimate Limit State) รูปแบบที่ 3 เมื่อปะทะกับลมทางด้านทิศเหนือ ซึ่งผืนผ้าใบต้องรับแรงดึงสูงสุด 11.03 กิโลนิวตันต่อเมตร ในบริเวณจุดปลายต่ำ (Low Point) ทางด้านทิศเหนือ (รูปที่ 12 ก) และเกิดการหย่อนตัว (Node Displacement) เนื่องจากแรงยกตัวของลม (Wind Suction) สูงสุดประมาณ 40 เซนติเมตร จากระดับปกติ ในบริเวณซีกด้านทิศตะวันออกขององค์อาคาร (รูปที่ 12 ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเมื่อถูกแรงกระทำในสภาวะจำกัดด้านการใช้งาน
ในรูปแบบที่ 4 เมื่อปะทะกับลมทางด้านทิศตะวันตกเฉียงใต้
(ก) แสดงแรงเค้นดึงบนผืนผ้าใบ (ข) แสดงระยะหย่อนตัวของผืนผ้าใบ

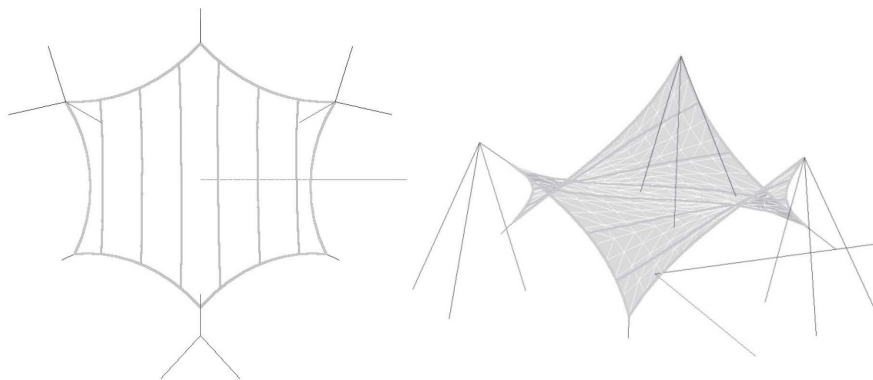
ตารางที่ 5 แรงกระทำสูงสุดในชิ้นส่วนของโครงสร้าง เมื่อถูกแรงกระทำในสภาวะจำกัดด้านกำลัง ในรูปแบบที่ 3 (ULS-03)

Code	Element	Max. Stress (kN)	Wind direction
M-409	Mast	-66.50	+ 270°
HC-003	Hanging cable	+40.20	+ 90°
TD-000	Tie-down cable	+45.50	+ 270°
TM-416	Tie-mast cable	+23.20	+ 270°
BC-005	Boundary cable	+28.20	+ 270°

จากตารางที่ 5 จะพบว่าแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในกรณีที่ ลมมาปะทะกับ ตัวโครงสร้างทางด้านทิศใต้ (+270°) มีเพียงชิ้นส่วนเดียวเท่านั้น คือ Hanging Cable ที่แรงสูงสุดเกิดขึ้น เมื่อลมมาปะทะกับ โครงสร้างทางด้านทิศเหนือ (+90°) แรงเค้นสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง จะถูกใช้ในการเลือกประเภทผ้าใบรับแรงดึง ขนาดของเคเบิล ตลอดจนออกแบบจุดเชื่อมต่อต่างๆ ในองค์อาคารต่อไป

6. การออกแบบรอยตัดผ้าใบรับแรงดึง (Patterning)

การออกแบบรอยตัดผ้าใบ เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการผลิต-ประกอบผืนผ้าใบ (Fabrication) ซึ่งกระทำโดยการตัด ผ้าใบออกเป็นชิ้นยาวจากม้วนผ้าใบ จากนั้นนำมาเชื่อมต่อกันด้วยความร้อน (Welding) ตามรูปทรงที่ออกแบบไว้ โดยการ ออกแบบรอยต่อผ้าใบจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุผ้าใบ ขนาดสัดส่วนความกว้างยาวของผ้าใบแต่ละชิ้น รวมถึงทิศทาง ของแนวยืน-แนวประสานของผ้าใบ ทั้งนี้เพื่อให้ได้รูปทรงที่มีความแข็งแรง และให้เหลือเศษวัสดุน้อยที่สุด โดยรูปแบบของ แนวรอยตัดผ้าใบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แนวรอยตัดผ้าใบรับแรงดึง วิเคราะห์โดยโปรแกรม ixForten 4000

เนื่องจากวัสดุผ้าใบรับแรงดึง มีความยืดหยุ่นสูงมาก (Elastic) และจะเสียรูป (Deformation) เมื่อได้รับแรงกระทำ ภายนอก เช่น แรงดึง หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้น เพื่อให้ได้รูปทรงที่ถูกต้องตามรูปแบบที่ออกแบบไว้ที่สุด จะต้อง มีการชดเชย (Compensation) บางส่วนที่จะถูกยืดออกเมื่อทำการก่อสร้าง โดยปริมาณของการชดเชย (Compensation Value) จะพิจารณาจากผล Biaxial Test ของวัสดุ โดยทั่วไปแล้ว ปริมาณการชดเชย จะแตกต่างกันระหว่างแนวยืน กับ แนวประสาน โดยแนวยืนมักจะทำการชดเชยน้อยกว่าแนวประสาน เนื่องจากมีความสามารถต้านทานแรงเค้นได้ดีกว่า

7. การประกอบและติดตั้งองค์อาคาร (Erection)

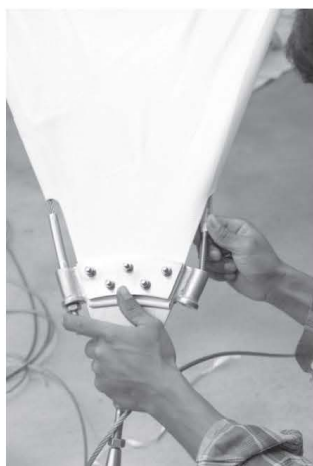
เมื่อขั้นตอนการผลิตผ้าใบ และเสาประกอบไม้ไผ่ รวมถึงอุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆ ดำเนินการผลิตเสร็จสิ้นแล้ว จึงเข้าสู่ขั้นตอนการประกอบสร้าง โดยพื้นที่ก่อสร้างโครงการวิจัย อยู่บริเวณลานกิจกรรมนักศึกษา คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

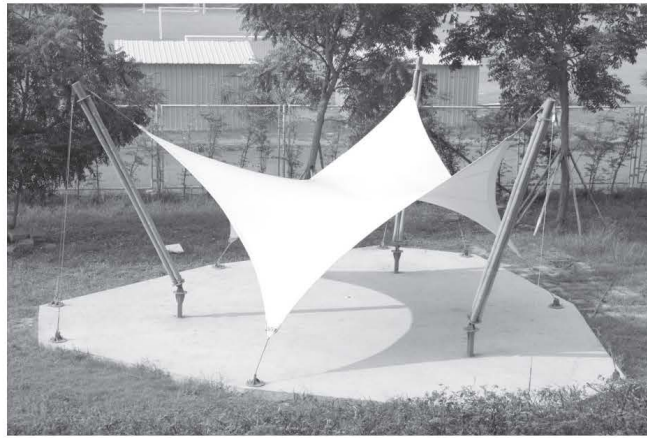
รูปที่ 14 การประกอบและติดตั้งองค์อาคารโครงการ “ปลากะเบน”

รูปที่ 14 แสดงขั้นตอนการประกอบ-ติดตั้งโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึงสูงร่วมกับโครงสร้างไม้ไผ่ โดยหลังจากที่วัสดุทั้งหมดถูกนำเข้าไปยังพื้นที่ก่อสร้าง เสาไม้ไผ่จะถูกติดตั้งเข้ากับฐานเสาแบบหมุนได้ (Pin-Connection) ที่เตรียมไว้ ขณะเดียวกัน เหล็กปะกับมุมผ้าใบ (Corner Plate) ก็จะถูกนำมาประกอบเข้ากับผ้าใบตามตำแหน่ง ก่อนที่จะถูกยกขึ้นไปติดตั้งตามจุดยึดตติง

เมื่อผ้าใบถูกนำขึ้นไปยึดกับจุดยึดตติงแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือการติดตั้งเคเบิลรับแรงดึง ทั้งในส่วนของ Boundary Cable และ Tie-Mast Cable จากนั้นจึงให้แรงดึง (Tensioning) ด้วยอุปกรณ์รatchet เลเวอร์ ฮอยส์ (Ratchet Lever Hoist, รูปที่ 15 ก) จนกระทั่งได้แรงดึงในระดับที่ออกแบบไว้ (รูปที่ 15 ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 15 อุปกรณ์ให้แรงดึงราเชท เลเวอร์ ฮอยสท์ และองค์อาคารที่เสร็จสมบูรณ์ของโครงการปลากะเบน

8. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลจากการนำไม้ไผ่มาประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างผ้าใบรับแรงดึงสูง สามารถกระทำได้จริง เนื่องจากคุณสมบัติในการรับแรงที่ดีของไม้ไผ่ มีน้ำหนักเบา สวยงาม อีกทั้งยังสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น ทำให้งบประมาณในการก่อสร้างน้อยกว่าใช้โครงสร้างเหล็ก แต่อย่างไรก็ดี ไม้ไผ่มีความเปราะสูง ดังนั้นเมื่อให้แรงดึง (Prestress) ในระดับหนึ่ง ไม้ไผ่บางท่อนเกิดการแตกในแนวนานเส้นยืน ทำให้ต้องใช้แหวนเหล็กมารัดไว้ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง นอกจากนี้การที่โครงสร้างอยู่กลางแจ้ง ต้องถูกแสงอาทิตย์ และฝนตลอดเวลา ก็มีผลทำให้ไม้ไผ่เสื่อมโทรมได้เร็ว ดังนั้น เมื่อเลือกไม้ไผ่แล้ว ต้องอบและเคลือบน้ำยาให้ดี ก่อนนำมาใช้ก่อสร้าง แต่ทางที่ดีที่สุดคือ ไม่ควรให้ไม้ไผ่อยู่กลางแจ้ง หรือถูกแสงอาทิตย์และน้ำฝนตลอดเวลา นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะอื่นๆ เพื่อศึกษาเพิ่มเติม เช่น การประกอบเสาไม้ไผ่ หากต้องการรวบมัดไม้ไผ่ 3 ท่อน (อย่างเช่นในโครงการวิจัยนี้) เพื่อรับแรงอัด ควรยึดกันด้วยวิธีใดจึงจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด และการออกแบบรอยต่อระหว่างไม้ไผ่ กับแผ่นเหล็ก (Steel Plate Connection) เพื่อให้ถ่ายผ่านแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันก็ยังคงไว้ซึ่งความงามของไม้ไผ่ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- วรุตม์ ไนยเวทย์ศิริกุล และภัทร ลีลาวัศมี. “การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ตงและชางนวล”. โครงการงานวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2546.
- Ambroziak, A. and Klosowski, P. “On Construction Solutions for Tensile Structures”. Lightweight Structures in Civil Engineering, Warsaw, 2006.
- Dunkelberg, K. et al. IL 31. “Bamboo as a Building Material”. Institute for Lightweight Structures, University of Stuttgart, 1985.
- Graefe, Rainer: Vela Erunt. “Die Zeltdächer der römischen Theater und ähnlicher Anlagen”. P.v. Zabern, Mainz, 1979.
- Houtman, R. “There is no material like membrane material”. Proceedings of TensiNet Symposium, Brussels, 2003.
- Janssen, J. J. A. “Bamboo in Building Structure”. Ph.D. diss., Technical University of Eindhoven, 1981.
- Mollaert, M. and Foster, B. “European Design Guide for Tensile Surface Structures”. Tensinet, 2004

- Seidel, Michael. **"Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction"**. Berlin, Germany, 2009.
- T. M. Obermann and R. Laude. **"Bamboo Poles for Spatial and Light Structures"**. Technische Universität Berlin, Germany, 2004.
- Zhou, F. C. **"Studies on Physical and Mechanical Properties of Bamboo Woods"**. Journal of Nanjing Techn. Coll.For. Prod 2:1-32, 1981.
- Xiaobing Yu. **"Bamboo: Structure and Culture"**. Fachbereich Kunst und Design, Universität Duisburg-Essen, Germany, 2007.