ระบบโครงสร้างแรงดึงสมบูรณ์ในงานสถาปัตยกรรม

โดย

นายวิษุวัต มาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม แผน ก แบบ ก 2 แนวความคิดในการออกแบบ(ออกแบบสถาปัตยกรรม)

ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาสถาปัตยกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ระบบโครงสร้างแรงดึงสมบูรณ์ในงานสถาปัตยกรรม

โดย
นายวิษุวัต มาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม แผน ก แบบ ก 2 แนวความคิดในการออกแบบ(ออกแบบสถาปัตยกรรม)
ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาสถาปัตยกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

TENSEGRITY STRUCTURAL SYSTEM IN ARCHITECTURE

By

MR. Visuwat MALAI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Architecture (Architecture)

Department of Architecture

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2017

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	ระบบโครงสร้างแรงดึงสมบูรณ์ในงานสถาปัตยกรรม
โดย	วิษุวัต มาลัย
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม แผน ก แบบ ก 2 แนวความคิดในการออกแบบ (ออกแบบสถาปัตยกรรม) ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ นันทพล จั่นเงิน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วีระ อินพันทัง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(อาจารย์ นันทพล จั่นเงิน)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(อาจารย์ นันทพล จั่นเงิน)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(อาจารย์ ดร. วิญญู อาจรักษา)

58054203 : สถาปัตยกรรม แผน ก แบบ ก 2 แนวความคิดในการออกแบบ(ออกแบบสถาปัตยกรรม) ระดับปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : โครงสร้างระบบแรงดึงสมบรูณ์

นาย วิษุวัต มาลัย: ระบบโครงสร้างแรงดึงสมบูรณ์ในงานสถาปัตยกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ นันทพล จั่นเงิน

ระบบโครงสร้าง Tensegrity เป็นระบบโครงสร้างที่ถือกำเนิดเป็นทางการเมื่อ 50 ปีก่อน โดยนิยามความหมายของโครงสร้างชนิดนี้คือโครงสร้างระบบแรงดึงสมบรูณ์ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่รับแรงอัด-แรงดึง และชิ้นส่วนที่รับแรงอัดแต่ละตัวจะไม่สัมผัสกันอีกด้วย วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือต้องการสร้างระบบโครงสร้าง Tensegrity ประเภทใหม่ที่มีอยู่จากของเดิม เพื่อตอบสนองรูปแบบ/รูปทรงใหม่ของโครงสร้าง Tensegrity ที่มีผลต่อฟังก์ชั่นการใช้งานภายในและข้อจำกัดของบริเวณพื้นที่ที่ติดตั้ง Tensegrity จึงทำการทดลองในเรื่องของวิธีการในการก่อตัวของโครงสร้าง Tensegrity ที่จะส่งผลต่อการเกิดรูปทรงต่างๆของโครงสร้างโดยรวมว่าจะเป็นไปในทิศทางไหนโดยวิธีการทำหุ่นโมเดลจำลอง-ไปจนถึงการทำขนาดจริง รวมถึงการทดลองในเรื่องวัสดุที่จะในมาใช้เป็นตัวโครงสร้างจริง

58054203 : Major (Architecture)

Keyword : Tensegrity

MR. VISUWAT MALAI : TENSEGRITY STRUCTURAL SYSTEM IN ARCHITECTURE THESIS ADVISOR : NANTAPON JUNNGURN

The structural system of Tensegrity was borned in 50 years ago. Then they define the meaning as the structural system, including the area obtained from pressure and gravity, The element that obtain pressure is not touching together. So the purpose of this studying is need to build the new structural system of Tensegrity to respond the new pattern of the structural system of Tensegrity and have the effect on function and restriction of settings area. Then I starting to experimentation in main of the solution formation of the structural system of Tensegrity that affect to other new every structure of all that was what the way to gone. In order to the solution to building the sample model and real model and the test of material.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

กิตติกรรมประกาศ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือของอาจารย์นันทพล จั่นเงิน อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาและแนะนำมาตั้งแต่เริ่มต้นในการศึกษา จนถึงกระบวนการขั้นสุดท้ายของการออกแบบ และขอขอบพระคุณ

รองศาสตราจารน์ ดร.วีระ อินพันทัง อาจารย์ ดร.วิญญู อาจรักษา ที่ได้กรุณาสละเวลามาร่วมเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายเตชินท์ เตชพลกุล นักศึกษาคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรรวมไปถึงนางสาวเกล้ากัลยาภรณ์ สวัสดิ์มงคลกุล และ นางสาวเขมินทรา โมกขะเวส นักศึกษาคณะมัณฑนศิลป์มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด อีกทั้งเพื่อนๆสาขาแนวความคิดในการออกแบบ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร รุ่นที่ 14 ทุกท่าน สำหรับคำปรึกษาทุกๆด้านในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้านนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อนิวัติ มาลัย คุณแม่ผดุงพร มาลัย และบุคคลในครอบครัวของข้าพเจ้าทุกๆท่าน ที่มีส่วนสำคัญในการสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด รวมไปถึงบุคคลผู้ให้ความช่วยเหลืออื่นๆซึ่งไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ทุกท่านด้วย

วิษุวัต มาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

2.ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

3.สมมุติฐานของการศึกษา 2

4.ขอบเขตของการศึกษา 2

5.ขั้นตอนของการศึกษา 3

6. ข้อตกลงเบื้องต้น 3

บทที่ 2 ความเป็นมาและประวัติศาสตร์ 4

2.1 จุดกำเนิด 4

2.2 ข้อโต้แย้ง 6

2.3 วิวัฒนาการ 8

บทที่ 3 แบบอย่างที่มีมาก่อนและการศึกษาที่สำคัญ 13

3.1 วัสดุและแรงดึง 13

3.2 แบบอย่างที่มีมาก่อน 16

3.2.1 สไกลอน (The Skylon) 18

3.2.2 หลังคาแบบแขวนและโครงสร้างที่ใช้แรงดึง 20

3.2.3 โดมเคเบิล 22
บทที่ 4 คำจำกัดความและกฎพื้นฐาน 26
4.1 คำจำกัดความ 26
4.2 ลักษณะโดยทั่วไป 30
4.3 กฎพื้นฐาน 32
4.3.1. การวิเคราะห์ความสมดุล 32
4.4 โครงสร้างหลัก 34
4.4.1. คุณลักษณะทั่วไป 34
4.4.2 ข้อดีของโครงสร้าง 36
4.4.3 ข้อด้อย 36
บทที่ 5 การจัดกลุ่มแบ่งประเภท 37
5.1 ระบบโดม 37
5.1.1 ยูนิตย่อยของ Tensegrity ระบบโดม 39
5.1.2 การเชื่อมต่อของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบโดม 40
5.1.3 จุดเด่นจุดด่อยของ Tensegrity ระบบโดม 41
5.2 ระบบเส้น 43
5.2.2 การเชื่อมต่อของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบเส้น 45
5.2.3 การควบคุมทิศทางของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบเส้น 46
5.2.3.1 การควบคุมทิศทางการบิดหมุนของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบเส้น 46
5.2.3.2 การควบคุมทิศทางการเลี้ยวของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบเส้น 49
5.2.4 จุดเด่นจุดด่อยของ Tensegrity ระบบเส้น 50
5.3 ระบบเดี่ยว 51
5.3.1 รูปแบบของโครงสร้าง Tensegrity ระบบเดี่ยว 51

5.3.2 การเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนรับแรงอัดของ Tensegrity ระบบเดี่ยว.....52

5.3.3 จุดเด่นจุดด่อยของ Tensegrity ระบบเดี่ยว 53

บทที่ 6 แนวความคิดในการออกแบบ และการออกแบบ สถาปัตยกรรมจาก Tensegrity 54

6.1 แนวคิดการออกแบบ.....54

6.2 กระบวนการทดลอง.....55

6.2.1 การทดลองครั้งที่ 1 56

6.2.2 การทดลองครั้งที่ 2 62

6.2.3 การทดลองครั้งที่ 3 66

บทที่ 7 บทสรุป.....76

รายการอ้างอิง 82

ประวัติผู้เขียน 84

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 Structure-Sculpture โดย Loganson Illustration taken from Gengnagel (2002) 4
ภาพที่ 2 Elementary Equilibrium 5
ภาพที่ 3 “Dragon” 8
ภาพที่ 4 Geodesic Tensegrity Dome 9
ภาพที่ 5 U.S. Pavilion for Expo ‘67 10
ภาพที่ 6 T-Octahedron Dome 11
ภาพที่ 7 Bridge, in Kuanshien (China) 14
ภาพที่ 8 Bridge, in Kuanshien (China) 14
ภาพที่ 9 Deformation under compression and under tension 15
ภาพที่ 10 Suspension bridge 16
ภาพที่ 11 Cable-stayed bridge 16
ภาพที่ 12 Barrios de Luna Bridge 17
ภาพที่ 13 Skylon 18
ภาพที่ 14 Skylon 19
ภาพที่ 15 Raleigh Arena โดย Nowicki 20
ภาพที่ 16 Music Pavilion โดย Frei Otto (1955) 21
ภาพที่ 17 German Pavilion for Expo'67 โดย F. Otto (1967) 21
ภาพที่ 18 หุ่นจำลองโครงสร้างโดมเคเบิล 23
ภาพที่ 19 Roof diagram for a Cable-Dome 24
ภาพที่ 20 Georgia Dome by Levy and Weidlinger Associates 24
ภาพที่ 21 Some Fuller’s tensegrities 27

ภาพที่ 22 Snelson with a double planar structure 28
ภาพที่ 23 Octahedron 30
ภาพที่ 24 Georgia Dome Illustration taken from Setzer (1992).....31
ภาพที่ 25 Georgia Dome 31
ภาพที่ 26 Author's derivation of the "Simplex" 32
ภาพที่ 27 Set of forces acting on a strut. 33
ภาพที่ 28 Set of forces acting on a cable.....34
ภาพที่ 29 Right-handed and Left-handed Simplex (dextrorse and Sinistrorse).....35
ภาพที่ 30 buckminster fuller 37
ภาพที่ 31 U.S. Pavilion for Expo '67 38
ภาพที่ 32 Geodesic Tensegrity Dome 38
ภาพที่ 33 ยูนิตย่อยของ Geodesic Tensegrity Dome.....39
ภาพที่ 34 ยูนิตย่อยของ Geodesic Tensegrity Dome.....39
ภาพที่ 35 การต่อยูนิตย่อยเข้าด้วยกัน Geodesic Tensegrity Dome 40
ภาพที่ 36 Geodesic Tensegrity Dome 40
ภาพที่ 37 Geodesic Tensegrity Dome 41
ภาพที่ 38 Geodesic Tensegrity Dome 42
ภาพที่ 39 Tensegrity ระบบเส้น.....43
ภาพที่ 40 Kenneth Snelson.....43
ภาพที่ 41 Tensegrity ระบบเส้น.....44
ภาพที่ 42 Tensegrity ระบบเส้น.....45
ภาพที่ 43 Tensegrity ระบบเส้น.....46
ภาพที่ 44 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น 46
ภาพที่ 45 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น 47

ภาพที่ 46 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น 47
ภาพที่ 47 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น 48
ภาพที่ 48 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น 48
ภาพที่ 49 การเลี้ยวของ Tensegrity ระบบเส้น 49
ภาพที่ 50 การเลี้ยวของ Tensegrity ระบบเส้น 49
ภาพที่ 51 Tensegrity ระบบเส้น.....50
ภาพที่ 52 Tensegrity ระบบเดี่ยว 51
ภาพที่ 53 Tensegrity ระบบเดี่ยว 52
ภาพที่ 54 Tensegrity ระบบเดี่ยว 53
ภาพที่ 55 Tensegrity ระบบเดี่ยว 53
ภาพที่ 56 การเพิ่ม-ลดขนาดทางหน้าตัด 55
ภาพที่ 57 การเพิ่ม-ลดขนาดความยาว 56
ภาพที่ 58 การทดลองครั้งที่ 1.....56
ภาพที่ 59 การทดลองครั้งที่ 1.....57
ภาพที่ 60 X- Module Tensegrity 57
ภาพที่ 61 X-tree Tensegrity.....58
ภาพที่ 62 การทดลองครั้งที่ 1.....58
ภาพที่ 63 การทดลองครั้งที่ 1.....59
ภาพที่ 64 การทดลองครั้งที่ 1.....59
ภาพที่ 65 ความสามารถรับแรงตามแนวยาว 60
ภาพที่ 66 ไม่สามารถรับแรงตามแนวตัดขวาง 60
ภาพที่ 67 ภาพแสดงแนวแรงทางตัดขวางของโครงสร้าง 61
ภาพที่ 68 การทดลองครั้งที่ 1.....61
ภาพที่ 69 การทดลองครั้งที่ 2.....62

ภาพที่ 70 การทดลองครั้งที่ 2 63
ภาพที่ 71 การทดลองครั้งที่ 2 63
ภาพที่ 72 การทดลองครั้งที่ 2 64
ภาพที่ 73 การทดลองครั้งที่ 2 65
ภาพที่ 74 แบบการทดลองครั้งที่ 1-2 66
ภาพที่ 75 แบบแสดงการพัฒนาโครงสร้าง Tensegrity 67
ภาพที่ 76 โครงสร้างการทดลองครั้งที่ 3 67
ภาพที่ 77 โครงสร้างการทดลองครั้งที่ 3 68
ภาพที่ 78 แบบจำลองการทดลองครั้งที่ 3 68
ภาพที่ 79 แบบจำลองการทดลองครั้งที่ 3 69
ภาพที่ 80 การทดลองครั้งที่ 1 69
ภาพที่ 81 การทดลองครั้งที่ 3 69
ภาพที่ 82 ภาพแสดงการพาดช่วงกว้างทางแนวยาวของโครงสร้าง 70
ภาพที่ 83 ภาพแสดงการพับงอทางแนวตัดขวางของโครงสร้าง 70
ภาพที่ 84 ภาพแสดงการเพิ่มแนวแรงดึง 71
ภาพที่ 85 การทดลองครั้งที่ 3 71
ภาพที่ 86 การทดลองครั้งที่ 3 72
ภาพที่ 87 การทดลองครั้งที่ 3 72
ภาพที่ 88 การทดลองครั้งที่ 3 73
ภาพที่ 89 การทดลองครั้งที่ 3 74
ภาพที่ 90 การทดลองครั้งที่ 3 75
ภาพที่ 91 การทดลองครั้งที่ 3 75
ภาพที่ 92 แบบจำลอง Tensegrity ระบบผสม 78
ภาพที่ 93 หุ่นจำลอง Tensegrity ระบบผสม 79

ภาพที่ 94 หุ่นจำลอง Tensegrity ระบบผสม 79

ภาพที่ 95 หุ่นจำลอง Tensegrity ระบบผสม 80

บทที่ 1

บทนำ

1.ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คำจำกัดความของ Tensegrity ได้ถูกนิยามโดยผู้เชี่ยวชาญหลายๆท่าน ซึ่งเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบายให้ง่ายที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยเบื่องต้น Tensegrity คือ หลักการทางโครงสร้างที่มีพื้นฐานจากการใช้องค์ประกอบแรงอัดและแรงดึงแบบต่อเนื่องเข้าด้วยกันทั้งโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างสามารถก่อรูปและทรงตัวอยู่ได้ด้วยตัวเอง โดยการถูกบีบอัดเกิดจากแรงภายในเครือข่ายของแรงดึง และชิ้นส่วนหลักที่ถูกบีบอัดจะไม่มีการสัมผัสกัน และด้วยคุณลักษณะดังกล่าว จึงทำให้ Tensegrity มักปรากฏอยู่ในงานประเภทพาดช่วงกว้าง อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของโครงสร้างประเภทนี้ที่มีความยืดหยุ่นและมีน้ำหนักเบา แต่ด้วยรูปแบบการเชื่อมต่อของแต่ละชิ้นส่วนภายในองค์ประกอบโครงสร้าง ที่มีความซับซ้อนและยากต่อการประกอบติดตั้ง จึงทำให้โครงสร้างประเภทนี้ไม่เป็นที่นิยมและเผยแพร่จึงขาดการพัฒนาต่อยอด โครงสร้าง Tensegrity จึงยังไม่มีความหลากหลายทางรูปแบบที่เพียงพอต่อการนำไปใช้กับงานบางประเภทได้ อันเนื่องมาจากรูปแบบทิศทางและวิธีการต่อตัวหรือเชื่อมต่อของชิ้นส่วนภายในตัว Tensegrity ที่จะเข้ามาประกอบกัน ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบหรือรูปทรงโดยรวมของโครงสร้างว่าจะออกมาเป็นทิศทางใด จุดๆนี้จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในรูปแบบของรูปทรงพื้นที่ที่จะนำ Tensegrity ไปใช้งาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการนำเสนอหลักการหรือวิธีการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนภายในตัว Tensegrity วิธีใหม่ เพื่อให้เกิดรูปแบบทางโครงสร้างของ Tensegrity ชนิดใหม่ ที่จะสามารถนำไปใช้เพื่อตอบสนองต่อรูปทรงพื้นที่ที่ต้องการใช้งาน ที่ถูกปกคลุมด้วย Tensegrity

2.ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

2.1 เพื่อทบทวนประวัติศาสตร์และความก้าวหน้าในโครงสร้างลักษณะนี้ ค้นหาแหล่งที่มาของช่วงเวลาและเน้นไปที่ผู้สร้างที่มีความเกี่ยวข้อง ผู้เชี่ยวชาญ และงานตีพิมพ์ซึ่งไม่เพียงแต่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมเท่านั้นแต่ยังเกี่ยวข้องกับสายงานอื่นๆซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการค้นคว้าต่อไปได้

2.2 เพื่อสร้างความหมายของลักษณะทางโครงสร้างและกรอบความคิดพื้นฐานของสิ่งที่เรียกว่า Tensegrity รวมถึงการอธิบายองค์ประกอบและแสดงให้เห็นถึงข้อดีข้อด้อยของ Tensegrity

2.3 เพื่อสร้างความหมายของ Tensegrity ให้มีความกระจ่างและเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปและสร้างการแบ่งประเภทของระบบ Tensegrity

2.4 เพื่อทำการออกแบบ Tensegrity ชนิดใหม่ที่สามารถควบคุมการขยายตัวได้ทั้งแนวกว้างและแนวยาว โดยที่ชิ้นส่วนองค์ประกอบภายในโครงสร้างไม่จำเป็นต้องกันเป็นระบบปิดหรือต่อกับครบระบบ

3.สมมุติฐานของการศึกษา

เมื่อจำแนกรูปแบบประเภทของโครงสร้าง Tensegrity โดยพิจารณาจากการขยายตัวหรือวิธีต่อตัวของชิ้นส่วนภายในโครงสร้าง จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ 1.ประเภทที่ขยายตัวเป็นแนวเส้นตรง 2.ประเภทที่ขยายตัวเป็นระบบแต่ต้องเป็นรูปทรงปิด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำคุณสมบัติของ Tensegrity ทั้งสองมาออกแบบผนวกรวมกันเพื่อสร้าง Tensegrity ที่สามารถขยายตัวได้ทั้งความกว้างและความยาวโดยที่ชิ้นส่วนภายในโครงสร้างไม่จำเป็นต้องต่อกันเป็นระบบปิด

4.ขอบเขตของการศึกษา

4.1 ศึกษาประวัติศาสตร์ความเป็นมาของโครงสร้าง Tensegrity คำจำกัดความของ Tensegrity รวมถึงแนวคิดในการออกแบบและวิเคราะห์คุณสมบัติ Tensegrity แต่ละประเภท เพื่อนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ

4.2 ศึกษาวิธีการต่อชิ้นส่วนภายในโครงสร้าง Tensegrity ที่จะสามารถต่อขยายตัวได้ทั้งแนวกว้างและแนวยาวโดยไม่ต้องต่อชิ้นส่วนที่เป็นระบบปิดหรือการรัดรอบขาโครงสร้าง

5.ขั้นตอนของการศึกษา

5.1 ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล จากเอกสารและหนังสือต่างๆ ที่เกี่ยวข้องรวมทั้งบทความจากหนังสือ บทความที่เผยแพร่บน Internet รายงาน และวิทยานิพนธ์

5.2 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รวบรวมมาทั้งหมด โดยนำมาจัดหมวดหมู่แยกแยะประเภทข้อมูลเพื่อให้เกิดความชัดเจนของการจำแนกประเภท Tensegrity

5.3 สรุปข้อมูลและจัดทำโปรแกรมทางสถาปัตยกรรม โดยพิจารณาจากข้อมูลทั้งหมดที่มุ่งเน้นให้เกิดแนวคิดในการพัฒนา Tensegrity ที่มีสามารถต่อขยายตัวได้ทั้งแนวกว้างและแนวยาวโดยไม่ต้องต่อชิ้นส่วนที่เป็นระบบปิดหรือการรัดรอบขาโครงสร้าง

5.4 ทำการออกแบบและทดลองด้วยการต่อหุ่นจำลองโมเดล เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของแบบที่วางไว้

5.5 สรุปแบบและข้อเสนอแนะ จากกระบวนการทดลองและพัฒนาแบบทั้งหมด นำเสนอแบบขั้นสุดท้าย หุ่นจำลอง และเอกสารวิทานิพนธ์

6. ข้อตกลงเบื้องต้น

6.1 วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพียงเพื่อต้องการนำเสนองานรูปทรงงานสถาปัตยกรรมโรงสร้าง Tensegrity รูปแบบใหม่ ที่จะสามารถนำไปใช้เพื่อตอบสนองต่อฟังก์ชั่นการใช้งานหรือตอบสนองต่อรูปทรงพื้นที่ จากเดิมมีข้อจำกัด

6.2 วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีข้อจำกัดของการทดลองเกี่ยวกับวัสดุจริงที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ Tensegrity โดยปัจจัยของเรื่องสถานที่ทดลอง เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงงบประมาณในการทดลอง จึงจะไม่ทำการวิจัยถึงขั้นละเอียดถึงการวิเคราะห์วัสดุที่นำมาใช้ ต้องมีขนาดเท่าไหร่ ชนิดใด และรูปทรงอย่างไร โดยจะทำการทดลองในเชิงการแสดงตัวอย่าง จากการสร้างหุ่นจำลองโดยใช้วัสดุที่มีอยู่ตามท้องตลาด ที่จะสามารถนำมาสร้างและแสดงให้เห็นถึงวิธีการแนวทางการทดลองของการออกแบบได้

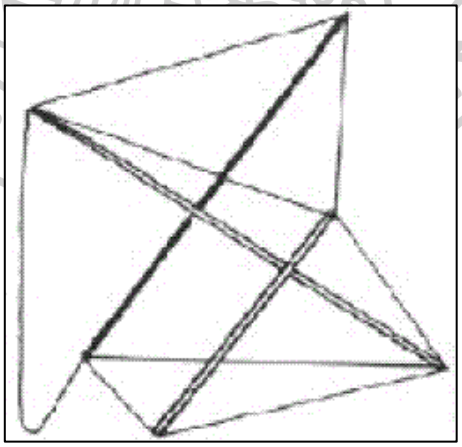
บทที่ 2

ความเป็นมาและประวัติศาสตร์

Tensegrity คือ ระบบโครงสร้างชนิดใหม่ที่กำลังได้รับการพัฒนา เกิดขึ้นมาได้ประมาณ 50 ปี ซึ่งก่อให้เกิดงานศิลปะที่น่าอัศจรรย์ มีน้ำหนักเบาและสามารถปรับให้มีความเหมาะสมได้ ประเภทของโครงสร้างนี้ไม่ค่อยเป็นที่รู้จักกันสักเท่าไร ดังนั้นความรู้เรื่องกลไกและองค์ประกอบที่สำคัญทางกายภาพก็อาจจะไม่ได้เป็นที่คุ้นเคยมากนักในหมู่สถาปนิกหรือวิศวกร อย่างไรก็ตาม หนึ่งในแง่มุมที่น่าแปลกและน่าสนใจในของโครงสร้าง Tensegrity ก็คือจุดกำเนิดของมันยังคงเป็นที่มีการโต้แย้งปรากฏอยู่เมื่อมีการพูดถึงการคิดค้นโครงสร้าง Tensegrity

2.1 จุดกำเนิด

มีผู้ชายสามคนได้รับการพิจารณาว่าเป็นผู้คิดค้น Tensegrity ได้แก่ Richard Buckminster Fuller, David Georges Emmerich และ Kenneth D. Snelson[1] แม้ว่าทั้งสามคนจะอ้างว่าตนเองเป็นผู้คิดค้นคนแรก แต่ R. Motro กล่าวว่า Emmerich รายงานว่าระบบโครงสร้าง Tensegrity ชิ้นแรกซึ่งเรียกว่า "Gleichgewichtkonstruktion" ถูกสร้างขึ้นโดย Karl Loganson ในปี 1920



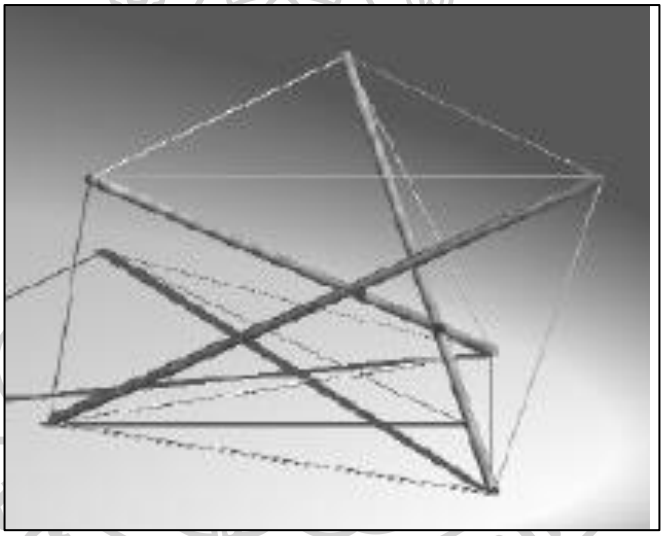
ภาพที่ 1 Structure-Sculpture

โดย Loganson Illustration taken from Gengnagel (2002)

[1] https://patents.google.com/patent/US3063521A/en

จากรูปภาพที่ 1 ตามที่ Emmerich อธิบายไว้ว่า: "Cette curieuse structure, assemblée de trois barres et de sept tirants, était manipulable à l'aide d'un huitième tirant detendu, l'ensemble étant déformable. Cette configuration labile est très proche de la protoforme autotendante à trois barres et neuf tirants de notre invention."

จากเนื้อหาที่กล่าวมานี้มีความหมายว่ามันคือโครงสร้างที่ประกอบด้วยแท่งเหล็กสามแท่ง เชือกเจ็ดเส้นและสายเคเบิ้ลคือลำดับที่แปด โดยที่แม้จะไม่มีแรงดึงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในระบบ แต่โครงสร้างก็สามารถคงความสมดุลเอาไว้ได้ เขายังกล่าวอีกว่าโครงสร้างแบบนี้มีความคล้ายคลึงกับระบบโครงสร้าง Tensegrity ที่คิดค้นขึ้นด้วยตัวเขาเอง “สภาวะสมดุลพื้นฐาน” ที่มีเสาค้ำ 3 เสาและสายเคเบิ้ล 9 สาย



ภาพที่ 2 Elementary Equilibrium

Illustration drawn by the author.

จากรูปภาพที่2 เห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกันกับรูปภาพที่1 แต่อย่างไรก็ตาม การขาดหายไปของแรงอัดซึ่งเป็นหนึ่งในลักษณะของระบบ Tensegrity ไม่ได้ทำให้ “ประติมากรรมโครงสร้าง” Loganson ได้รับการพิจารณาว่าเป็นประติมากรรมที่มีการใช้โครงสร้าง Tensegrity

หนึ่งในจุดที่เป็นข้อโต้แย้งมากที่สุดของการเป็นบิดาแห่งการให้กำเนิดโครงสร้าง Tensegrity ก็คือความขัดแย้งส่วนตัวซึ่งกินเวลานานถึง 30 ปีระหว่าง Richard Buckminster Fuller และ Kenneth D. Snelson ซึ่งตัวสเนลสันอธิบายไว้ในจดหมายถึง R. Motro ว่าระหว่างหน้าร้อนใน

ปี 1948 Richard Buckminster Fuller ซึ่งขณะนั้นรับตำแหน่งเป็นศาสตราจารย์ใหม่ในวิทยาลัยแบล็ค เมาท์เท่น (รัฐนอร์ท แคโลไลน่า สหรัฐอเมริกา) ซึ่งเป็นอีกบทบาทของเขาอันนอกเหนือจากการเป็นสถาปนิก และสำหรับสเนลสัน ณ ตอนนั้นเป็นแค่นักศึกษาสาขาศิลปะที่เข้าเรียนในวิชาโมเดลทางเรขาคณิตของฟูลเลอร์ และหลังจากช่วงฤดูร้อนนั้น เขาได้รับแรงบันดาลใจจากสิ่งที่เขาเรียนรู้มาจากวิชาของฟูลเลอร์และอาจารย์ท่านอื่นๆ สเนลสันเริ่มต้นเรียนการทำโมเดลสามมิติ และได้สร้างประติมากรรมที่หลากหลาย สเนลสันประสบความสำเร็จในประติมากรรมแนวใหม่ ซึ่งได้รับการพิจารณาว่าเป็นโครงสร้าง Tensegrity แรกที่เขาได้ออกแบบไว้ เมื่อเขานำประติมากรรมนั้นมาแสดงให้ฟูลเลอร์และถามความเห็นของเขา ตัวฟูลเลอร์ตระหนักได้ว่านั่นคือคำตอบของคำถามที่เขารอคอยมานานหลายปี จากคำพูดของฟูลเลอร์ (1961) ที่ว่า:

“เป็นเวลากว่า 21 ปีก่อนที่ผมจะได้พบกับ Kenneth D. Snelson ผมพยายามค้นหาทุกแง่ทุกมุมในแนวความคิดที่เกี่ยวกับ Tensegrity นอกเหนือจากสิ่งที่ผมค้นพบแล้ว ซึ่งก็ได้แก่ การตั้งชื่อและการพัฒนาเรขาคณิตที่ใช้เวกเตอร์แบบหลายมิติและโครงสร้าง Tensegrity แบบสามมิติ ผมไม่สามารถที่จะผสานพวกมันเข้าด้วยกันเพื่อที่จะได้มาซึ่งการค้นพบ Tensegrity แบบหลายมิติที่มีแกนพิกัดจำนวน 4 5 6 แบบสมมาตรกัน”

2.2 ข้อโต้แย้ง

แม้ว่าในตอนเริ่มต้น ฟูลเลอร์ได้กล่าวว่าสเนลสัน เป็นผู้ค้นพบโครงสร้าง Tensegrity แต่ในช่วงหลัง เขาเริ่มที่จะพิจารณาว่ามันควรจะเป็นเขาที่เป็นผู้ค้นพบ เพราะอันที่จริงแล้ว เขาคิดค้นคำนี้ขึ้นในปี 1955 ซึ่งเป็นคำย่อของคำว่า “Tensional-Integrity หรือ การรวมเป็นหนึ่งโดยอาศัยการดึง” ดังนั้น การเรียกโครงสร้างเหล่านี้โดยใช้คำที่เขาเลือกไว้ จะทำให้คนคิดว่านั่นคือสิ่งประดิษฐ์ของเขา “การสร้างชื่อที่แปลกคือกลยุทธ์ของฟูลเลอร์ในการสร้างความคิดที่มีความเหมาะสมเหมือนตัวเขาเอง” นี่เป็นคำพูดของสเนลสันในสื่อหลายๆฉบับ[2]

[2] Tensegrity Structures and their Application to Architecture หน้า 8-9

สิ่งที่เห็นได้ชัดเจนต่อจากนี้ก็คือ นักศึกษาสาขาศิลปะของเขาต้องมีความสับสนแน่นอน ในปลายปี 1949 ฟูลเลอร์เขียนถึงสเนลสันว่า ชื่อของเขาจะได้รับการจดจำไว้ในประวัติศาสตร์ แต่หลายปีต่อมาเขาได้เปลี่ยนใจและขอให้สเนลสันไม่เปิดเผยตัวเองจนกระทั่งช่วงเวลาหนึ่ง สถานการณ์นี้ทำให้สเนลสันต้องรบเร้าให้ฟูลเลอร์สร้างการยอมรับในผลงานของตัวเขากับสาธารณะในช่วงระหว่างงานนิทรรศการแสดงผลงานของฟูลเลอร์ในปี 1959 ณ พิพิธภัณฑ์ศิลปะร่วมสมัย (MOMA) ในกรุงนิวยอร์ค นั่นทำให้ผลงานของสเนลสันกลายมาเป็นที่รู้จักโดยทั่วไป

2-3 ปีต่อมา ฟูลเลอร์กล่าวถึงสเนลสันอีกครั้งว่า สัญชาตญาณที่น่าอัศจรรย์ช่วยให้เกิดช่วงเวลาที่สำคัญระหว่างการค้นพบโครงสร้างที่ใช้แรงอัดต่อเนื่องจากเพื่อนร่วมงานของผม ซึ่งก็คือ เคนเนท สเนลสัน และเขาจะต้องได้รับการกล่าวถึงในการบรรยายของผมเรื่องความคิดที่ได้จากการค้นหา "Tensegrity" ของผม"

อย่างไรก็ตาม ฟูลเลอร์มักคิดว่าถ้าหากเขาไม่ได้เป็นคนกระตุ้นให้เกิดการค้นพบของสเนลสัน Tensegrity ก็จะไม่มีทางได้รับการคิดค้นให้เป็นโครงสร้างแบบใหม่ ในความเป็นจริงแล้ว ฟูลเลอร์ไม่เคยกล่าวถึงสเนลสันในหนังสือที่เกี่ยวกับ Tensegrity ซึ่งมีความสำคัญและเป็นที่รู้จักกันในชื่อ "*Synergetics*"

งานวิจัย Tensegrity จากทั้งสองคนยังคงดำเนินต่อไป ในปี 1980 ฟูลเลอร์เขียนจดหมายที่มีความยาว 28 หน้าเพื่อตอบคำถามของสเนลสันในจดหมายที่มีความยาว 1 หน้า จากการอ้างอิงของ *Vesna (2000)* เกี่ยวกับเนื้อหาในจดหมายเหล่านั้นได้ใจความว่า พวกเขาพยายามอธิบายถึงความเป็นเจ้าของการคิดค้นโครงสร้างแต่ไม่ได้พูดถึงการแสดงตนเป็นผู้คิดค้น ทั้งนี้เพราะว่าฟูลเลอร์ยืนยันว่าผู้คิดค้นไม่สามารถประดิษฐ์ตัวงานออกมาแสดงเป็นที่ประจักร แต่ในทางกลับกันเขาก็ได้จดสิทธิบัตรทางความคิดของผลงานไว้เรียบร้อยแล้ว

แล้วใครกันแน่...ที่เป็นผู้คิดค้น Tensegrity? คำถามนี้ถึงแม้ว่าจะมีความสำคัญต่อคนทั้งสอง แต่บางทีแล้วมันอาจจะดีกว่าที่จะให้ความสนใจทางด้านโครงสร้างเหล่านี้มากกว่าการโต้แย้งที่มีในอดีต

2.3 วิวัฒนาการ

สเนลสันมีความสนใจในการทำงานกับโครงสร้าง Tensegrity ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในงานประติมากรรมของเขา และได้รับการสร้างสรรค์มาจนถึงทุกวันนี้ แม้ว่าเขาจะเริ่มต้นศึกษาพื้นฐานแนวคิดของ Tensegrity รวบรวมและสรุปข้อมูลลงในเว็บไซต์ของเขา เขาก็ยังมุ่งมั่นที่จะทำงานของเขาในแง่มุมของประติมากรรมและงานเพื่อความสุนทรีย์ เขาหลีกเลี่ยงการใช้แนวทางด้านกายภาพและคณิตศาสตร์ในเชิงลึกเนื่องจากพื้นฐานด้านความเป็นศิลปินในตัวเขา และความคิดเห็นของเขาที่เกี่ยวข้องกับความยากลำบากในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ Tensegrity กระบวนการนี้เอื้อประโยชน์ต่อการพัฒนาโครงสร้างแบบที่แตกต่างกันและไม่สมมาตรกัน เขาได้นำความรู้ที่มาจากสัญชาตญาณของตัวเขาเองมาใช้และประสบความสำเร็จในการสร้างประติมากรรมที่ปรากฏให้เห็นอยู่ทั่วโลก

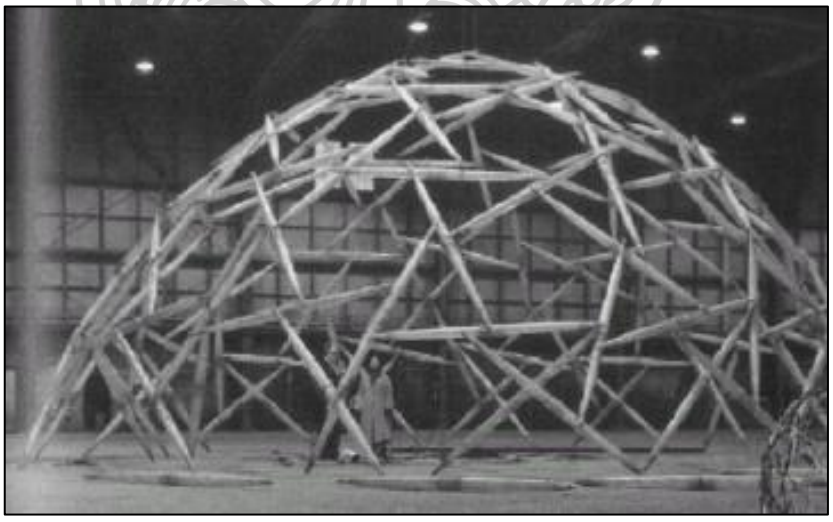
ภาพที่ 3 “Dragon”

Illustration taken from Snelson (2004)

มากไปกว่านั้น การสร้างระบบ Tensegrity จำเป็นต้องอาศัยเทคนิคที่ละเอียด ซึ่งสเนลสันได้ทำการปรับปรุงมาเป็นเวลาหลายปี กระบวนการที่แท้จริงที่สเนลสันสร้างขึ้นในงานของเขาถือเป็นศาสตร์และศิลป์ในตัวของมันเอง อันที่จริงแล้ว ตามที่ *Fox (1981)* ได้กล่าวไว้ สเนลสันคือบุคคลเดียวที่มีความสามารถในการวางแผนจัดการงานก่อสร้างของเขา

ในทางตรงกันข้าม ฟูลเลอร์เลือกใช้คนละแนวทางกับสเนลสัน พวกเขาทำการศึกษารูปแบบและสัญลักษณ์ที่เป็นไปได้หลายๆแบบ โดยเฉพาะระบบที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม พวกเขาสร้างมันโดยใช้โมเดลและการทดลองเชิงประจักษ์ซึ่งถือเป็นเครื่องมือหลักของพวกเขา และตรงกันข้ามกับสเนลสัน พวกเขามองหาการประยุกต์ที่เป็นไปได้ในงานด้านสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม

หลังจากได้ใช้เวลาในการพิจารณาประติมากรรมของสเนลสัน ผู้คิดค้นสิ่งประดิษฐ์จากรัฐแมสซาชูเซตส์ก็ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบแบบง่ายๆ และสร้างเสากระโดงตามแนวคิด Tensegrity ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบสามเสา สี่เสา ห้าเสา หกเสา แนวตั้งหันออกด้านข้างตามลำดับ ในปี 1961 ฟูลเลอร์ได้คิดค้น เสาค้ำหกเสาทรงยี่สิบหน้าแบบ tensegrity six-islanded-strut icosahedron Tensegrity (expanded octahedron)[3] หลังจากนั้น งานชิ้นนี้ได้ถูกพัฒนาโดยคนอื่นๆ จนกลายเป็นระบบ Tensegrity ที่เรียกว่า สภาวะสมดุลของเวกเตอร์ จุดๆนี้จึงทำให้รูปแบบที่สำคัญของโครงสร้าง Tensegrity ที่ได้ถือกำเนิดขึ้นมา



ภาพที่ 4 Geodesic Tensegrity Dome

Illustration taken from Gengnagel (2002)

[3] Tensegrity Structures and their Application to Architecture หน้า 11

ด้วยเหตุนี้เอง บัคกี้ (ซึ่งเป็นชื่อที่รู้จักกันในนามของ บัคมินสเตอร์ ฟูลเลอร์) พยายามที่จะมองหาการออกแบบ การประยุกต์และวิธีการในการสร้างงานรูปแบบใหม่ เขาใช้ความพยายามสองสามครั้งในการออกแบบโดมแบบ Geodesic ตามแบบ Tensegrity ในรูปภาพที่ 4 และจดทะเบียนสิทธิบัตร และงานชิ้นนี้ก็ถือเป็นต้นแบบของการพัฒนาแนวทาง Tensegrity ของฟูลเลอร์

ภาพที่ 5 U.S. Pavilion for Expo ‘67

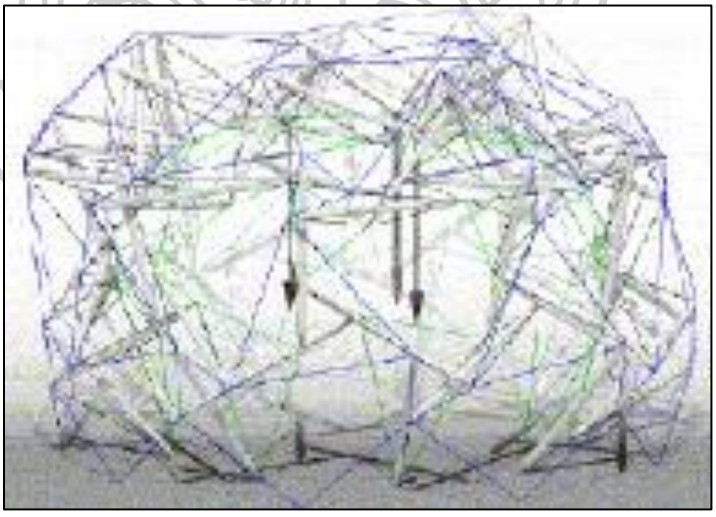
Illustration taken from CISC (2003)

อย่างไรก็ตามฟูลเลอร์ตั้งใจที่จะทำโดมโครงสร้าง Tensegrity ที่สามารถปกคลุมพื้นที่ได้ทั้งเมือง แต่กลับไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่เขาคิดเอาไว้ และนอกจากนี้ เขาถูกบังคับให้สร้าง ฟองมอนทรีอัล (Montreal bubble) ที่งานแสดงนิทรรศการปี 1967 ซึ่งเป็นประติมากรรมที่แสดงให้เห็นถึงโดมที่เกี่ยวกับรูปร่างและเนื้อที่ของโลกโดยที่เขาไม่ได้ใช้พื้นฐานของ Tensegrity ในการสร้าง เนื่องจากเหตุผลด้านเวลาและเงินทุน

ต่อจากนี้ไป จะกล่าวถึงผู้สร้างสรรค์งานบางท่านที่ได้รับแรงบันดาลใจจากงานของฟูลเลอร์ โดยเริ่มต้นที่จะค้นหาระบบโครงสร้างแนวใหม่ มองหาการประยุกต์ใช้กับงานทางสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม

และ René Motro อาจจะเป็นหนึ่งในผู้เชี่ยวชาญด้าน Tensegrity ในปัจจุบัน เขาเริ่มต้นตีพิมพ์งานศึกษาของเขาในหัวข้อนี้ในปี 1973: Topologie des structures discrètes. Incidence sur leur comportement mécanique. Autotendanticosaédrique ซึ่งบทความนี้คือบันทึกภายในห้องทดลองของคณะวิศวกรรมโยธาของมหาวิทยาลัย Montepelier (ประเทศฝรั่งเศส) เกี่ยวกับพฤติกรรมด้านเครื่องกลในโครงสร้างเหล่านี้ จากช่วงเวลานั้นต่อมา ห้องทดลองและวิศวกรจากที่นี่ได้รับการอ้างอิงที่และมักปรากฏในงานวิจัยทางด้าน Tensegrity

ในระหว่างปี 1980 ผู้คิดค้นบางท่านพยายามที่จะพัฒนาการศึกษาด้านนี้ ซึ่งถูกบุกเบิกโดยคนรุ่นก่อนๆ Robert Burkhardt เริ่มต้นการตรวจสอบเชิงลึกและพยายามเขียนจดหมายติดต่อกับฟูลเลอร์ (ในปี1982) เพื่อที่จะหาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับเรขาคณิตและคณิตศาสตร์ในโครงสร้าง Tensegrity



ภาพที่ 6 T-Octahedron Dome

Illustration taken from Burkhardt (1994-2004)

ผลงานสุดท้ายที่เกี่ยวกับ Tensegrity เกิดขึ้นเมื่อ 20 ปีต่อมา ถือเป็นผลงานที่สมบูรณ์ มีประโยชน์และได้รับการปรับปรุง ผลงานนั้นชื่อว่า Practical Guide to Tensegrity Design (เบิร์ก คาร์ด, 1994-2004) โดยจะกล่าวถึงบุคคลสำคัญได้แก่ Ariel Hanaor ผู้ซึ่งให้คำนิยามการสร้างโพรงหรือช่องเล็กๆสองมิติที่อยู่ในสภาวะสมดุลด้วยตัวมันเองได้และ Nestorovic ซึ่งเป็นผู้เสนอการออกแบบหลังคาทรงโดมโลหะที่ผสานแรงดึงเอาไว้

Connelly and Back (1998a, 1998b) มีความตั้งใจในการหาหลักเกณฑ์โดยทั่วไปที่เหมาะสมกับโครงสร้าง Tensegrity แบบสามมิติ การใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์และความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่ก่อให้เกิดแคตาล็อกที่สมบูรณ์ของ Tensegrity อันประกอบไปด้วยรายละเอียดของประเภทของความเสถียรและความสมมาตร

และรวมถึงผู้เขียนคนอื่นๆ (S. Pellegrino, A.G. Tibert, A.M. Watt, W.O. Williams, D. Williamson, R.E. Skelton, Y. Kono, Passera, M. Pedretti, เป็นต้น) ได้ทำการศึกษาฟิสิกส์คณิตศาสตร์ (จากมุมมองเชิงเรขาคณิต เชิงการเชื่อมต่อ และเชิงพีชคณิต) และเครื่องกลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง Tensegrity อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากสิ่งที่ผู้เขียนได้กล่าวถึง กลุ่มของจากมหาวิทยาลัย Meontpellier ก็ไม่ค่อยมีงานวิจัยทางด้านนี้ที่สามารถนำเอาความรู้ใหม่ๆมาประยุกต์ใช้ได้

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 3
แบบอย่างที่มีมาก่อนและการศึกษาที่สำคัญ

แม้ว่าต้นกำเนิดของ Tensegrity ที่ได้รับการกล่าวถึงในบทก่อนหน้านี้ วิวัฒนาการและการพัฒนาและได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับเหตุการณ์สถานการณ์ต่างๆ เนื้อหาในบทนี้ พยายามที่จะอธิบายให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้อย่างไรที่จะทำให้โครงสร้างสมัยใหม่และร่วมสมัยประสบความสำเร็จได้จากจุดกำเนิดเริ่มต้นของ Tensegrity

3.1 วัสดุและแรงดึง

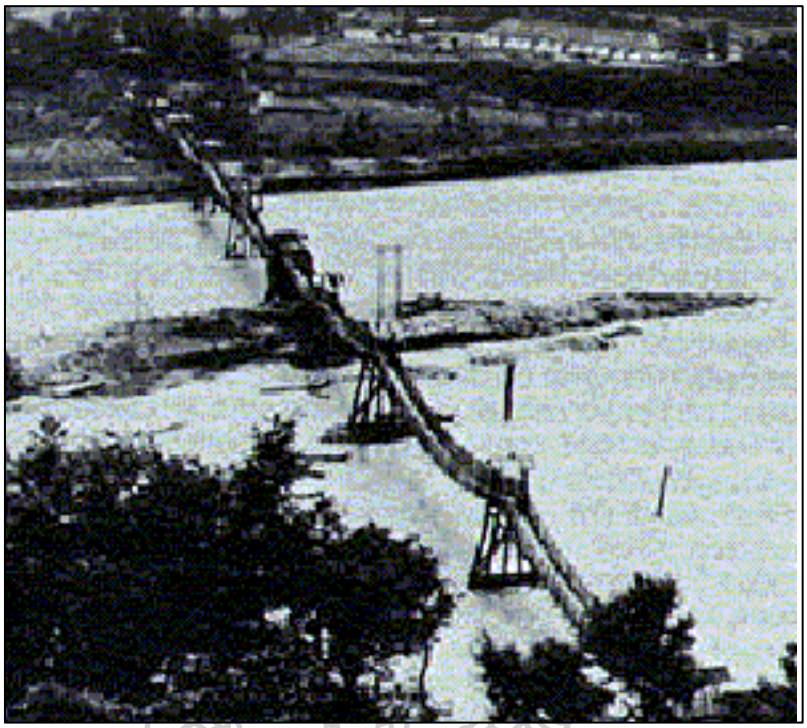
จากความจริงที่ว่าตัวตัวรับแรงอัดของโครงสร้าง Tensegrity เหล่านี้ ก็คือหนึ่งในความต่อเนื่องของแรงดึง การค้นคว้าหาวัสดุที่มีความเหมาะสมสำหรับกำลังของแรงดึงจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก การใช้โครงสร้างที่มีประสิทธิภาพในแรงอัดและแรงดึง อาจจะดูเป็นสิ่งที่ไม่เชื่อว่าจะเป็นไปได้ในช่วงก่อนศตวรรษที่ 18 ทั้งนี้ก็เพราะการไร้ความสามารถในประสิทธิภาพของตัววัสดุ ในปี 1985 ซึ่งในช่วงศตวรรษที่ 18 มีเพียงไม้ที่สามารถทนแรงอัดและแรงดึงได้ จึงถูกนำใช้ประโยชน์ (โดยเฉพาะการก่อสร้างเรือ) ซึ่งสามารถรับแรงได้ 10,000 psi [1]

อย่างไรก็ตาม ในการผลิตเหล็กที่มีปริมาณมากครั้งแรกในปี 1851 ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ เหล็กนั้นสามารถรับแรงไปถึงจุดที่ 50,000 psi ของทั้งแรงอัดและแรงดึง นำมาซึ่งความเป็นไปได้หลายๆอย่างในการก่อสร้าง และจากการอ้างอิงของเอ็ดมอนสัน การสร้างสะพาน Brooklyn Bridge เป็นการเปิดประตูสู่ยุคสมัยของนวัตกรรมการออกแบบที่ใช้แรงดึง และจากคำพูดของฟูลเลอร ได้กล่าวไว้ว่า “แรงดึงคือสิ่งที่ใหม่มาก”

แต่จากมุมมองข้าพเจ้า มีความคิดเห็นว่าคำพูดนั้นไม่ได้ถูกต้องสักทีเดียว เพราะเราไม่ควรลืมว่าสะพานแขวนแห่งแรกถูกสร้างมาจากแนวคิดโครงสร้างการใช้แรงดึงมาเมื่อหลายศตวรรษก่อนหน้านี้ แม้ว่าสะพานพวกนั้นจะถูกสร้างมาจากเชือกและไม้ ถึงแม้จะยังไม่มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่มากๆได้ สะพานพวกนั้นก็น่าจะเป็นระบบแรกที่ใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบของแรงดึงจากวัสดุอุปกรณ์ที่สร้าง

---

[1] psi = pounds per square inch. (1 psi = 0.069 bar = 6.89 KPa = 0.068 Atm)



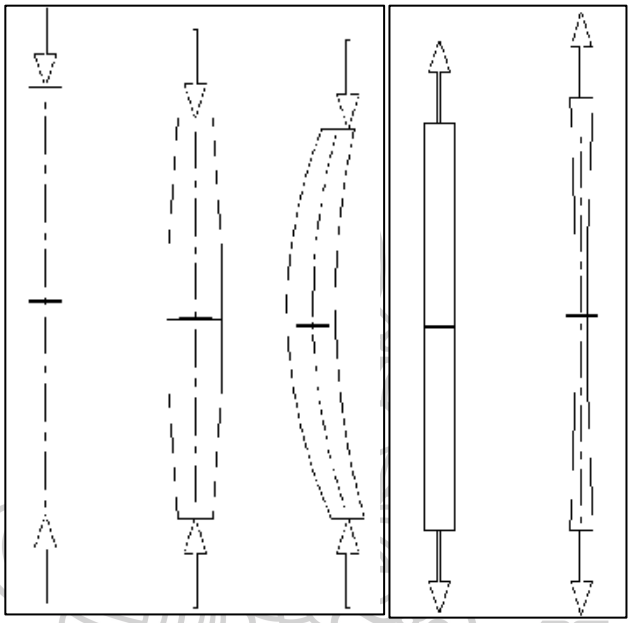
ภาพที่ 7 Bridge, in Kuanshien (China)

ภาพที่ 8 Bridge, in Kuanshien (China)

ตัวอย่างสะพาน An-Lan Bridge, in Kuanshien (China) ซึ่งเป็นสะพานแขวนที่เก่าแก่ที่สุดที่ยังคงมีการใช้งาน (ถูกสร้างประมาณ ค.ศ. 300) เป็นสะพานที่สร้างมาจากเชือกที่ร้อยมาจากไม้ไผ่

และถูกแขวนโดยใช้เสา 7 ต้น โดยที่เสา 6 ต้นถูกสร้างมาจากไม้ชนิดแข็งและสำหรับเสาตรงกลางถูกสร้างมาจากหินแกรนิต

แต่อย่างไรก็ตาม มีหลักฐานว่าการพัฒนาเหล็กและอัลลอยด์ต่างๆ นำมาสู่ผลลัพธ์ที่ทำให้วิศวกรและสถาปนิกสามารถสร้างงานออกแบบใหม่ๆรวมถึงแนวคิดใหม่ๆได้ วัสดุใหม่ๆเหล่านั้นไม่ได้ทำหน้าที่เพียงแค่เพิ่มความต้านทานขององค์ประกอบเหล่านั้นแต่มันยังช่วยลดขนาดเนื้อที่ของตัววัสดุและน้ำหนักของวัสดุ

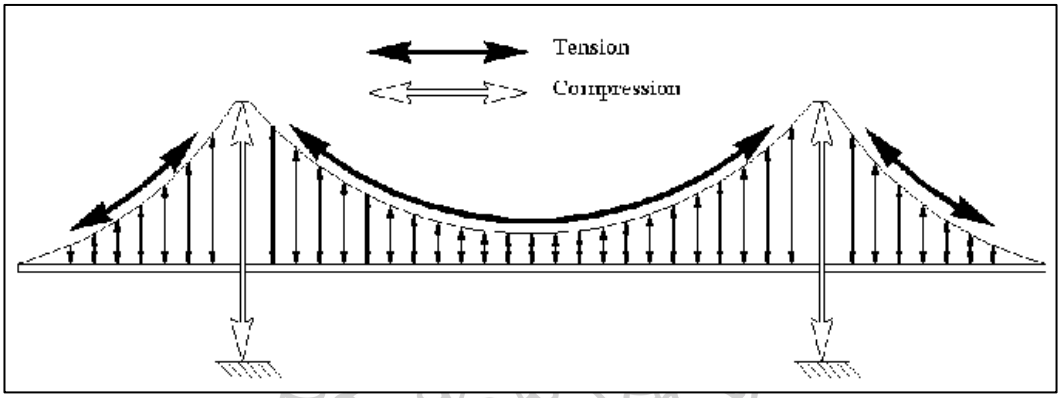


ภาพที่ 9 Deformation under compression and under tension.

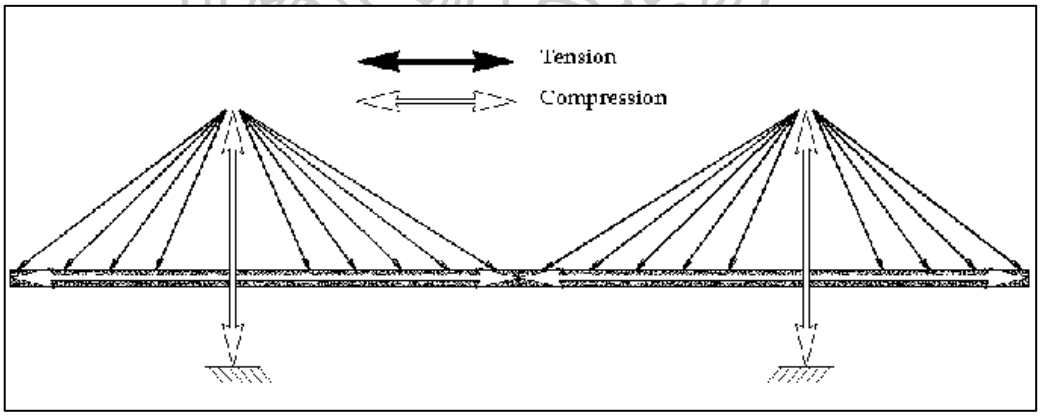
โดยพฤติกรรมขององค์ประกอบภายใต้น้ำหนักมีความแตกต่างกันตามประเภทของสิ่งของที่บรรทุก ดังที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3.3 เมื่อชิ้นส่วนแนวเส้นตรงถูกกดอัดเข้าไปตามแนวแกนกลาง จะทำให้เกิดการถูกบีบอัดเข้าไปของเนื้อวัตถุมารวมกันที่ตรงกลางและการทำให้วัตถุเกิดการโค้งงอ ในทางตรงกันข้าม เมื่อองค์ประกอบที่เหมือนกันได้รับแรงดึงในลักษณะเดียวกันนี้ เนื้อของวัตถุจะบางลงและยืดออก แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือมันยังคงรูปเป็นแนวแกนเส้นตรงด้วยเหตุผลนี้เองนวัตกรรมในวัสดุอุปกรณ์จึงเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับโครงสร้างที่มีการบีบอัด ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีส่วนประกอบที่แรงกดจะต้องต้านรับการโค้งงอได้ และส่วนที่มีแรงดึงจะต้องต่อต้านแรงลากดึงได้

3.2 แบบอย่างที่มีมาก่อน

จากการค้นพบ Tensegrity ในช่วงศตวรรษที่ 19 และ 20 ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวงการการออกแบบสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม ในปี 1948 งานบางส่วนถูกเข้าใจว่าเป็นงานประเภท Tensegrity โดยเฉพาะงานที่เกี่ยวข้องกับการใช้หลักการแรงอัด-แรงดึง



ภาพที่ 10 Suspension bridge



ภาพที่ 11 Cable-stayed bridge

จากสะพานแขวนในประเทศจีนที่การกล่าวถึงในย่อหน้าด้านบนจะแสดงให้เห็นในรูปภาพประกอบที่ 10 และสะพานแบบอื่นๆก็ได้ยกระดับความสำคัญของแรงดึงและแรงอัดในช่วงศตวรรษก่อนหน้านี้ สิ่งนี้ก็คือกรณีของสะพานขึงเคเบิล ซึ่งใช้สายเคเบิลในการรองรับพื้นภายใต้แรงอัด ดังนั้น พื้นจะถูกอัดแรงเพื่อให้เกิดความสมดุล ตามรูปภาพที่ 11

ภาพที่ 12 Barrios de Luna Bridge

by J. Manterola. World record of cable-stayed bridges in 1983.

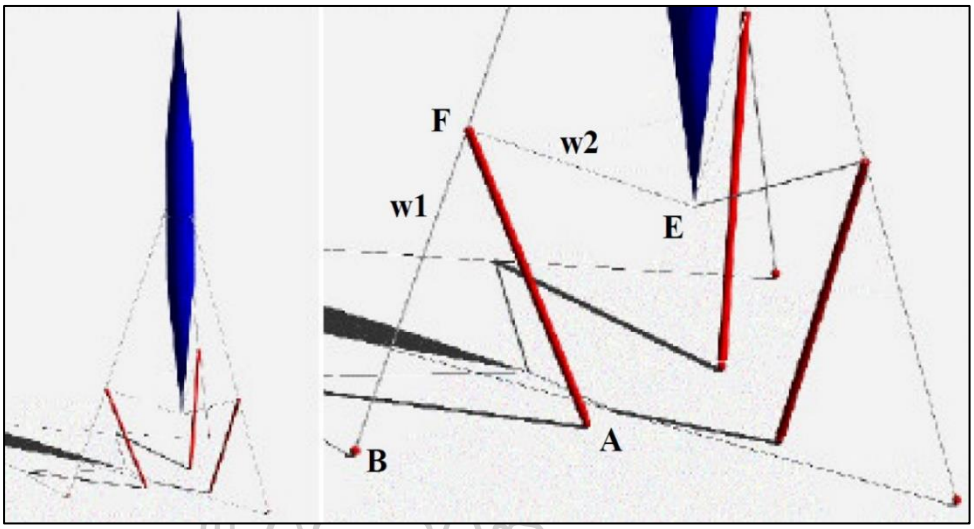
ภาพตัวอย่างจะแสดงเห็น คือ สะพานบาริออส เดอ ลูน่า ในประเทศสเปน สร้างโดย ฮาเวียร์ แมนเทโรลา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการใช้ทั้งแรงอัด-แรงดึง ได้อย่างดีเยี่ยมในเรื่อง โดยตัวหอคอยทั้งสองมีความกว้างขนาด 440 เมตร

3.2.1 สไกลอน (The Skylon)

ในปี 1951 ซึ่งเป็นสามปีหลังจากการค้นพบ Tensegrity อย่างเป็นทางการ ณ งานนิทรรศการที่จัดขึ้น ณ กรุงลอนดอน ในงานนั้น มีการจัดการแข่งขันการสร้างงานในแกนแนวตั้ง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของพื้นฐานงานนิทรรศการระดับนานาชาติ ฟิลลิป โพเวล และฮิลเดลโก โมยา (ได้รับความช่วยเหลือและแรงบันดาลใจจากฟีลิกซ์ ซามูเอลลี) ออกแบบสไกลอน

ภาพที่ 13 Skylon

สไกลอนได้รับการเลือกให้เป็นงานสร้างสรรที่ดีที่สุด โดยหลังจากนั้น 4-5 ปี ครูกแชงค์และเบอร์สโตว กล่าวว่าโครงสร้างที่คล้ายกับเข็มนี้ คือ อนุสาวรีย์ที่ไม่มีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการทำงานใดๆ หากแต่มันกลายมาเป็นสัญลักษณ์ของงานนิทรรศการ สัญญาณแห่งความเป็นไปได้ด้านเทคโนโลยีและสังคม และสุดท้ายมันก็ได้กลายมาเป็น สิ่งอ้างอิงสำหรับวิศวกรและสถาปนิกในอนาคต ยอดแหลมที่สูง 300 ฟุต คือ ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกับซิการ์ที่ถูกสร้างมาจากอลูมิเนียมซึ่งสามารถถูกแขวนได้อย่างแทบไม่น่าเชื่อจากสายเคเบิลเพียงสามเส้น และดูเหมือนจะลอยได้ด้วยความสูง 40 ฟุตจากพื้น



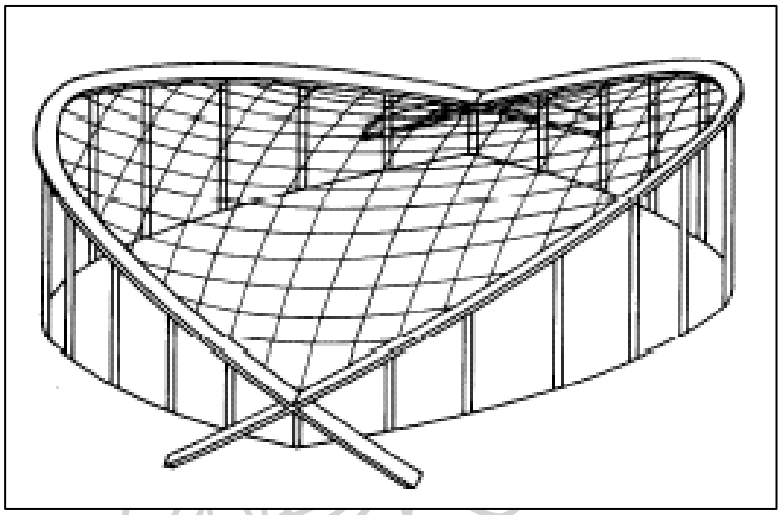
ภาพที่ 14 Skylon

โครงสร้างที่แสดงในภาพประกอบที่ 3.8 ประกอบด้วยเส้นลวดเหล็กที่มีแรงดึงจากเสาตั้งปลายแบบขยายออกสามเส้นที่ใช้พาดเส้นลวด จากการอ้างอิงของโมยา ผู้ซึ่งเป็นเสมือนบิดาของแนวความคิดนี้

“ด้วยความอัจฉริยะที่น่าอัศจรรย์ใจที่เกิดจาก ฟีลิกซ์ ซามูลเอลลี่ ผู้ซึ่งจัดสรรให้ระบบตัวเชื่อมต่อแรงที่อยู่ภายใต้เสาสามเส้นที่ใช้พาดด้วยเส้นลวด เมื่อโครงสร้างทั้งหมดถูกประกอบขึ้น เขาก็จะตรึงเส้นลวดตัวเชื่อมต่อเหล่านี้และยกเสาเหล่านี้ให้สูงขึ้น สิ่งนี้คือการใส่แรงดึงเข้าไปในเคเบิลทั้งหมด และการทำแบบนั้นทั้งหมดก็กลายมาเป็นโครงสร้างที่มีแรงอัด การทำเช่นนี้สามารถลดการใช้จำนวนเส้นลวดที่ต้องยึดสไกลอนเพื่อลดการแกว่งไปมาได้กว่าครึ่งหนึ่ง การขาดหายไปของเส้นลวดที่คอยดึงพยุงโครงสร้างตั้งตรง มันดูเหมือนจะมีความอันตรายมาก คุณอาจรู้สึกว่ามันไม่มีเส้นลวดมากพอที่จะค้ำชูโครงสร้างไว้ได้ แต่นี่คือสิ่งที่ทำให้เกิดความน่าสนใจมากยิ่งขึ้น” (ครูแชก, 1995)

3.2.2 หลังคาแบบแขวนและโครงสร้างที่ใช้แรงดึง

ในระหว่างปี 1950 การใช้สายเคเบิลในงานลักษณะที่ใช้ดึงวัสดุเมมเบรนต่างๆ และในปี 1950 ที่งาน Fair Arena (รัฐนอร์ท แคโลไลน่า) มีการนำเสนอการออกแบบงานลักษณะนี้โดยแมททิว โนวิกกี้ ซึ่งเกิดขึ้นจากแนวความคิดของการสร้างหลังคาแบบแขวน



ภาพที่ 15 Raleigh Arena

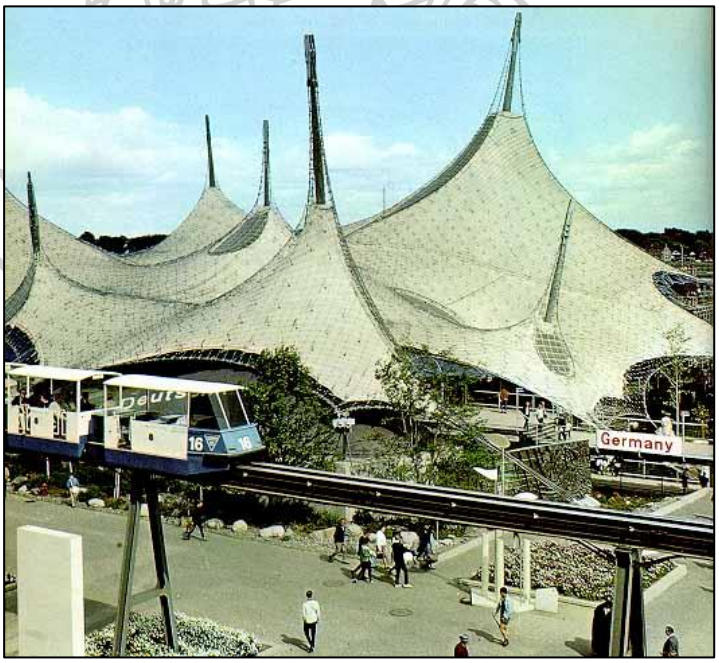
โดย Nowicki

ในปีเดียวกัน นักศึกษาคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ชาวเยอรมันได้สังเกตเห็นแบบร่างตัวนี้ ในระหว่างการเข้าโครงการแลกเปลี่ยนที่สหรัฐอเมริกา เขารู้สึกตื่นเต้นและประทับใจในแนวคิดเชิงนวัตกรรมชิ้นนี้เป็นอย่างมาก ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ เขาเริ่มต้นศึกษางานลักษณะนี้อย่างเป็นระบบและนำข้อมูลมาเสนอในวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกของเขาในปี 1952 ชื่อของเขาก็คือ เฟร ออตโต้

ศูนย์พัฒนาแห่งการก่อสร้างโครงสร้างน้ำหนักเบาถูกตั้งขึ้นโดยตัวเขาเอง 5 ปีต่อมาในกรุงเบอลินและในปี 1964 มันถูกรวมเข้ากับสถาบันแห่งโครงสร้างพื้นผิวเบาแห่งมหาวิทยาลัยสตุ๊ตการ์ทเพื่อเพิ่มงานวิจัยในสถาปัตยกรรมที่ใช้แรงดึง ดังนั้น งานบางชิ้นที่มีความสำคัญได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้เป็นคุณสมบัติด้านแรงดึงในวัสดุต่างๆ โดยเฉพาะ เหล็ก และก็รวมถึงโพลียูรีเทน โพลีเอสเตอร์ พีวีซี ไฟเบอร์ชนิดแก้วและฝ้าย เป็นต้น จากโปรเจคเหล่านั้น มีหนึ่งโปรเจคที่มีโครงสร้างคล้ายเต็นท์ลักษณะตรึงสี่จุดที่ใช้ในงานเทศกาลดนตรีแห่ง Bundesgartenschau เมืองแคสเซล ประเทศเยอรมันในปี 1955

ภาพที่ 16 Music Pavilion

โดย Frei Otto (1955)



ภาพที่ 17 German Pavilion for Expo'67

โดย F. Otto (1967)

และโครงสร้างข่ายเคเบิลขนาดใหญ่อันแรกที่ทำมาจากวัสดุหุ้มประเภทไฟเบอร์เกิดขึ้นที่หอแสดงของเยอรมันที่งานแฟร์ระดับโลกที่มอนทรีอัล และรวมถึงสนามโอลิมปิก ณ กรุงมิวนิคในปี 1972 ถูกสร้างขึ้นโดยจอร์ก ชเลค (Jörg Schlaich)

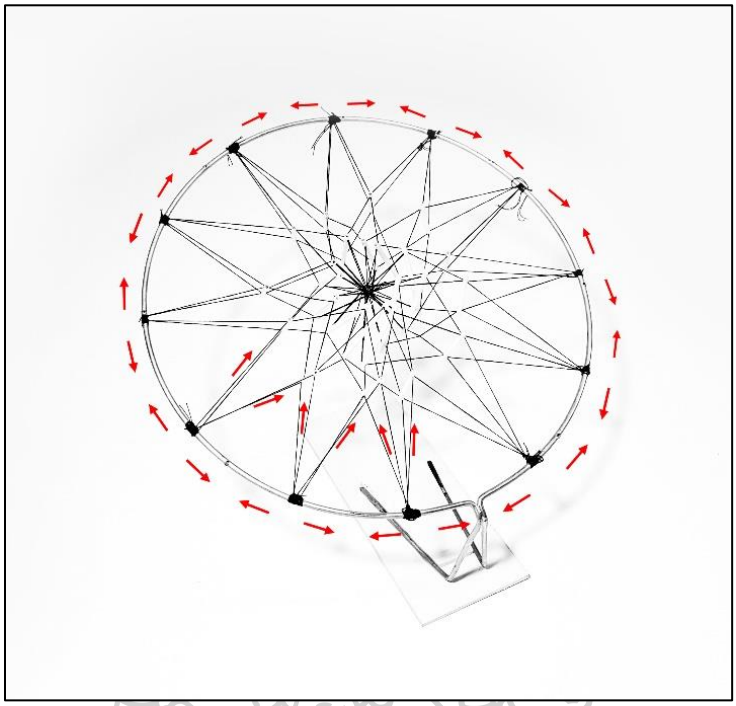
ถึงแม้โปรเจคเหล่านี้จะยังไม่ถือว่าเป็นโครงสร้างระบบ Tensegrity แต่ก็มีความสำคัญกับการช่วยพัฒนาวงการโครงสร้าง Tensegrity เพราะเมมเบรนชนิดนี้สามารถนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างในส่วนของแรงดึงได้

3.2.3 โดมเคเบิล

โดมเคเบิล หรือ โดมที่มีลักษณะเป็นวงล้อลวด ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นโดยเดวิด ไกเกอร์ ในปี 1986 นับตั้งแต่นั้นมา โดมอีกสองถึงสามอันก็ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิคนี้ โดยใช้หลักการคานที่รับน้ำหนัก ที่เป็นเหมือนตัวรัศมีวงตามแนวโครงสร้าง ถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงแหวนภายนอกใน และค่อยๆบรรจบกับวงแหวนภายในเพื่อที่จะเชื่อมต่อทุกอย่างเข้าด้วยกัน

แม้ว่าจะมีสถาปนิกและวิศวกรบางส่วนพิจารณาว่าโครงสร้างของหลังคาเหล่านี้เป็น Tensegrity แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ตามหลักการของ Tensegrity โดมเคเบิลไม่ถือว่าเข้าข่ายโครงสร้างประเภทนี้ เนื่องจากโครงสร้าง Tensegrity จะมีองค์ประกอบของแรงอัดอยู่ในขอบเขตของมัน

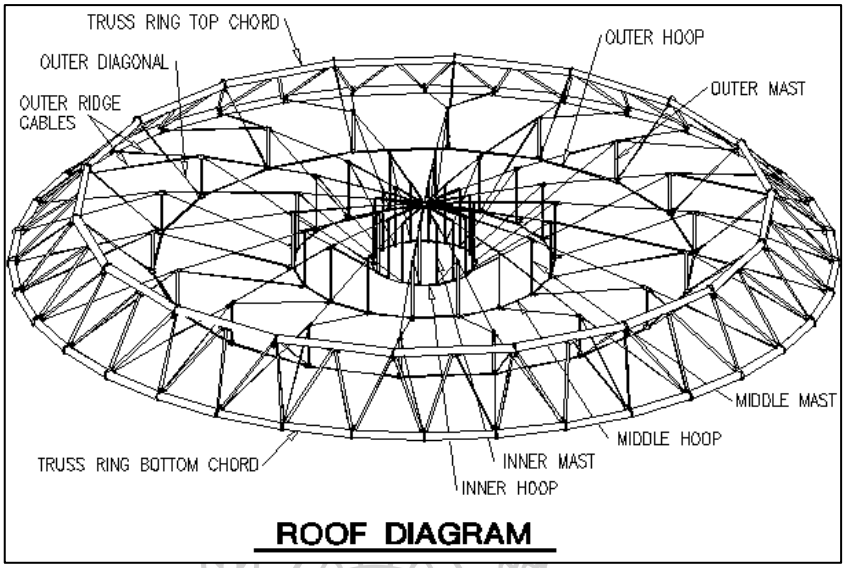
โดยเหตุผลที่เป็นข้อโต้แย้งนี้จะถูกนำมาเสนอในบทถัดไป ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว สเนลสันไม่ได้คิดว่ามันคือ ระบบโครงสร้าง Tensegrity เมื่อถูกถามถึงหัวข้อนี้ ตัวเขาตอบกลับมาอย่างสุขุมว่า “โดมที่คุณพูดถึงไม่สามารถถูกพิจารณาว่าเป็น Tensegrity ได้ แม้ว่าผู้คนอยากที่จะเรียกมันว่ายังงั้นก็เถอะ อันที่จริงแล้ว พวกมันคือล้อจักรยาน โลกต้องการชื่อที่แตกต่างสำหรับขอบล้อที่แข็งหรือ”



ภาพที่ 18 หุ่นจำลองโครงสร้างโดมเคเบิล

การยอมรับว่าโครงสร้างนี้มีความแตกต่างกับ Tensegrity สามารถดูได้จากหลักฐานกฎพื้นฐานของ Tensegrity โดยชิ้นส่วนที่รับแรงอัดพวกนี้จะไม่อยู่ติดหรือสัมผัสกัน และพวกมันก็ถูกเชื่อมต่อด้วยชิ้นส่วนที่รับแรงดึงที่มีความต่อเนื่อง เช่นสายเคเบิล ซึ่งในกรณีของโครงสร้างโดมเคเบิล เปรียบเสมือนโครงวงแหวนรอบนอกของโครงสร้างคือชิ้นส่วนที่รับแรงอัดแบบมีความต่อเนื่องต่างหาก[1]

โดมเคเบิลตัวแรกถูกออกแบบโดยไกเกอร์สำหรับใช้ในโอลิมปิก ณ กรุงโซล ปี 1986 ตามมาด้วยสนามเรดเบิร์ดในเมืองอิลลินอยส์ซึ่งเป็นโดมเคเบิลวงรีแห่งแรก ในปี 1988 โดมฟลอริด้าซันโคสท์ใน เซ็นท์ปีเตอร์สเบิร์ก ปี 1988 และสนามเทหยวนในประเทศไต้หวัน ปี 1993



ภาพที่ 19 Roof diagram for a Cable-Dome

อันที่จริงแล้ว โดมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลกจนถึงทุกวันนี้ ซึ่งเป็นหนึ่งในโครงสร้างประเภทนี้ คือ จอร์เจียโดมในแอตแลนต้า (1992) โดยบริษัทเลวีและเวดลิงเกอร์

ภาพที่ 20 Georgia Dome by Levy and Weidlinger Associates

[1] Tensegrity Structures and their Application to Architecture หน้า 28

3.3 Tensegrity ที่เปรียบเสมือนกฎสากล

จุดเริ่มต้นของ Tensegrity ถูกเชื่อมโยงเข้ากับงานประติมากรรม ต่อมาก็มีความเกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมและคณิตศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิศวกรรมโยธาและเครื่องกลพยายามที่จะทำการศึกษาถึงคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้โครงสร้างนี้ อย่างไรก็ตาม ในเวลานั้น นักวิทยาศาสตร์บางคนเริ่มต้นจากฟูลเลอร์ สเนลสัน พิจารณว่า Tensegrity เป็นเสมือนกฎพื้นฐานของ space ที่จากโครงสร้างขนาดใหญ่สามารถจะแยกย่อยไปยังขนาดโครงสร้างขนาดเล็กได้ คล้ายดังกับโครงสร้างของสิ่งต่างๆในธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาแรงอัดและแรงดึงตามแนวแรงของโครงสร้าง Tensegrity พบว่ามีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างอะตอม ณ จุดภายใต้แรงโน้มถ่วง ในความคิดเห็นของผู้เขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีความคิดเห็นคิดว่า Tensegrity น่าจะเป็นระบบโครงสร้างอีกหนึ่งระบบที่ดี เสมือนสิ่งต่างๆในธรรมชาติที่ถูกการคัดเลือกสรรสร้างมาแล้ว

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 4
คำจำกัดความและกฎพื้นฐาน

นับเป็นเวลาหลายปีที่เราพยายามหาคำจำกัดความที่ชัดเจนของ Tensegrity ให้ไม่มีความกำกวมและถูกยอมรับในหลายๆสาขา มันเป็นสิ่งจำเป็นในการระบุให้แน่ชัดว่าโครงสร้าง Tensegrity นี้คืออะไร ทั้งนี้เพราะเราจะสามารถพิจารณาโครงสร้างบางประเภทได้ว่าเป็นโครงสร้าง Tensegrity ที่แท้จริงหรือไม่โดยการพิจารณาจากคำจำกัดความที่แตกต่างกัน

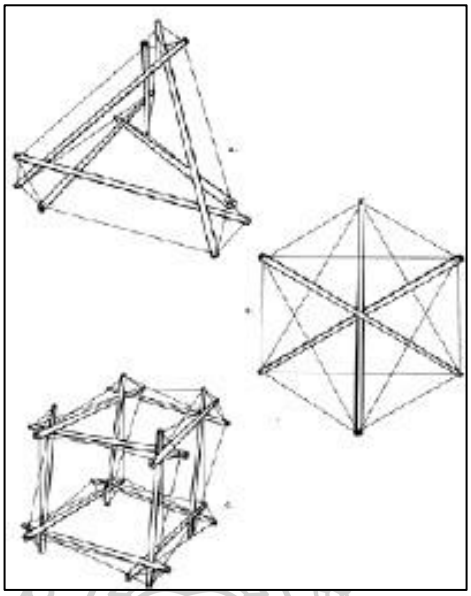
ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้านี้ มีหลายกรณีที่คำว่า Tensegrity ถูกใช้แบบผิดๆเพื่อใช้นิยามประเภทของโครงสร้างที่มีพื้นฐานมาจากองค์ประกอบที่เกิดจากแรงอัดและแรงดึง จะเห็นได้ชัดว่า นี่คือความผิดพลาด เพราะ Tensegrity มีกฎของตัวมันที่มีความแตกต่างอย่าง

4.1 คำจำกัดความ

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางการวิเคราะห์ในระบบโครงสร้างเหล่านี้ คำจำกัดความที่แตกต่างกันจะถูกนำมาเสนอแบบเรียงตามลำดับก่อนหลังของช่วงเวลา

คำอธิบายแรก ซึ่งได้ถูกอธิบายมาแล้วในบทที่ 2 ได้รับการให้คำนิยามจากเจ้าของสิทธิบัตร ซึ่งเขาพยายามที่จะอธิบายให้เห็นถึงสิ่งที่พวกเขาคิดค้น เห็นได้ชัดว่าในช่วงเวลานั้น มันเป็นสิ่งที่ยากในการสร้างความเข้าใจและหาคำจำกัดความที่สมบูรณ์ที่สามารถสรุปแต่ละองค์ประกอบที่มีความซับซ้อนของ Tensegrity ได้

ในบทความที่ชื่อว่า Tensegrity ซึ่งเขียนโดย บัคมินสเตอร์ ฟูลเลอร์ ในปี 1961 ซึ่งอธิบายให้ทราบเกี่ยวกับกฎ และแนวคิดหลักที่ใช้ควบคุมระบบความสมบูรณ์ของแรงดึง แต่เขาไม่ได้ให้คำนิยามที่แน่ชัด ในสิทธิบัตรของเขา เขาได้อธิบายว่าโครงสร้างแบบนี้ คือ “ความมากมายของเสาที่มีการอัดแรงที่ไม่ต่อเนื่อง โดยถูกจัดสรรไว้ในกลุ่มของสามเสาขึ้นไป ซึ่งถูกเชื่อมต่อโดยองค์ประกอบของแรงดึงที่ใช้ในการสร้างสามเหลี่ยมที่มีแรงดึง” อย่างไรก็ตาม เขาก็ได้ให้คำอธิบายอย่างสั้นๆที่ถูกนำมาใช้ในประวัติศาสตร์ของ Tensegrity “องค์ประกอบที่มีการบีบอัดจนกลายมาเป็นเกาะเล็กๆที่รายล้อมไปด้วยทะเลแห่งแรงดึง” หลายปีต่อมา ฟูลเลอร์เขียนไว้ในหนังสือ Synergetics ถึงคำอธิบายเพิ่มเติม ดังนี้:



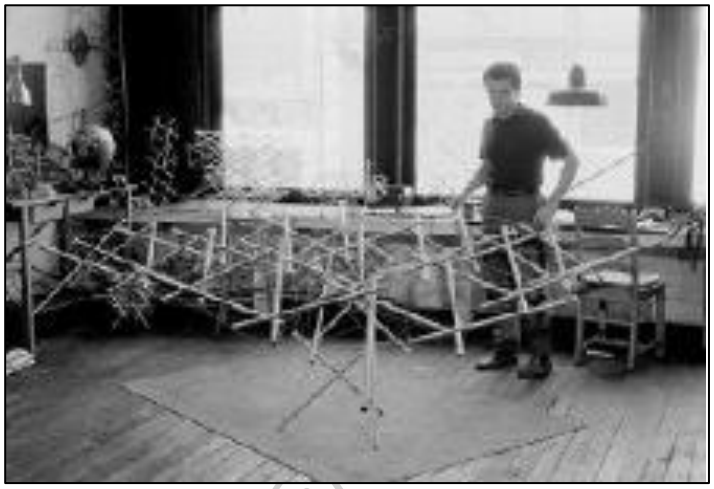
ภาพที่ 21 Some Fuller's tensegrities

"Tensegrity อธิบายให้เห็นถึงกฎความสัมพันธ์กับโครงสร้างโดยที่รูปทรงของโครงสร้างคือสิ่งที่การันตีได้โดยพฤติกรรมที่ตายตัว ความต่อเนื่องที่ครบถ้วนของแรงดึงในระบบ และไม่ใช่จากพฤติกรรมขององค์ประกอบที่มีการอัดตัวแบบต่อเนื่องหรือแบบเฉพาะตัวเฉพาะที่"

บิดาแห่ง Tensegrity อีกคนก็คือ เดวิด จี เอ็มเมอริช เขาประกาศไว้ในสิทธิบัตรสิ่งที่เขาคิดค้นว่านวัตกรรมที่เขาประดิษฐ์ขึ้นมาสามารถนำมาใช้อธิบายได้ถึงรูปแบบเฉพาะของการเป็นโครงสร้าง Tensegrity ซึ่งถูกแสดงด้วยภาพวาด ด้วยวิธีนี้เอง เขาหลีกเลี่ยงภาระในการให้คำอธิบายที่มีความจำกัด

ส่วน เคนเนท สเนลสัน สามารถให้คำจำกัดความของเขาที่มีความกระจ่าง ในงานสิทธิบัตรของเขาเองในปี 1965 โดยเขาอธิบายไว้ว่า

"นวัตกรรมในปัจจุบันเกี่ยวข้องกับกรอบแนวคิดด้านโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างใหม่ๆ ซึ่ง Tensegrity คือชิ้นส่วนที่มีการบีบอัดโดยไม่อยู่ติดหรือสัมผัสกันและอีกชิ้นส่วนที่มีแรงดึงถูกนำมาเชื่อมต่อกันเพื่อสร้างโครงข่ายที่มีแรงดึงอย่างต่อเนื่อง"



ภาพที่ 22 Snelson with a double planar structure

และถึงแม้ว่าเขาจะชอบเรียกมันว่า “โครงสร้างที่มีการบีบอัดแบบลอยตัว” เขาได้อธิบายสิ่งเหล่านั้นไว้เพิ่มเติมดังต่อไปนี้

“Tensegrity อธิบายให้เห็นถึงระบบโครงสร้างที่ประกอบด้วยกลุ่มเสาค้ำที่สามารถยืดขยายได้และมีการบีบอัดในตัวอยู่ภายในโครงข่ายของเส้นเอ็นที่มีแรงดึง โดยที่เสาค้ำไม่จำเป็นต้องสัมผัสซึ่งกันและกัน” *(สเนลสัน, 2004)*

นอกจากนี้ ดังที่ได้กล่าวถึงในบทก่อนหน้านี้ สเนลสันได้ให้คำอธิบายที่กระจ่างของเขาว่า

“โครงสร้าง Tensegrity คือ โครงสร้างแข็งแรงที่มีการอัดแรงภายในตัว และข้อจำกัดเช่นนั้นทำให้โครงสร้างอีกหลายๆตัวไม่ถูกพิจารณาว่าเป็นโครงสร้าง Tensegrity”

ในปี 1976 แอนโทนี่ พิวจ์ ได้อธิบายลักษณะของ Tensegrity ซึ่งได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับความหมายที่ถูกเพิ่มเติมเข้ามาคือ

“ระบบ Tensegrity ถูกสร้างเมื่อมีกลุ่มของส่วนประกอบที่มีการบีบอัดแบบไม่ต่อเนื่องที่มีปฏิสัมพันธ์กับกลุ่มของส่วนประกอบที่มีแรงดึงแบบต่อเนื่องเพื่อกำหนดปริมาตรแรงที่เสถียรกัน”

จนกระทั่งในช่วงปี 1993 ที่ Schodeck ตระหนักได้ว่าคำจำกัดความที่อ้างอิงอยู่ภายใต้ความซ้ำซ้อนและมิติของการเคลื่อนที่อาจจะเป็นการอธิบายที่ดีกว่าการให้คำจำกัดความที่กำกวมที่มีอยู่ ณ ตอนนั้น ดังนั้น เขาบรรยาย Tensegrity ว่าเป็นโครงสร้างแข็งที่ทำจากโลหะเส้นยาวที่ขาดความต่อเนื่องในการบีบอัดและมีเส้นที่มีความต่อเนื่องในแรงดึง แต่ละส่วนประกอบมีหนึ่งมิติของความซ้ำซ่อนในชิ้นส่วน

Bin-Bing Wang (1998) ให้คำจำกัดความที่ไปไกลกว่าความหมายที่มีอยู่ เขาระบุลักษณะอื่นๆที่มีความสำคัญ ดังนี้: โครงสร้าง Tensegrity คือ การค้ำหรือสนับสนุนด้วยตัวมันเอง และทำให้แข็งแรงได้ด้วยการกดอัดตัวมันเอง และคำจำกัดความที่กว้างมากขึ้นถูกอธิบายโดย Wang และ Li (1998, 2003) มีดังต่อไปนี้

“ระบบ Tensegrity คือ โครงสร้างเคเบิลที่ใช้การเชื่อมต่อระหว่างจุด มีการคงตัวแบบอิสระ ตัวระบบถูกเชื่อมต่อด้วยสายเคเบิลโดยการกดอัดกับระบบที่ไม่มีความต่อเนื่องของเสาค้ำที่ยืดขยายได้ และโครงสร้างเคเบิลที่ใช้การเชื่อมต่อระหว่างจุดมีการคงตัวแบบอิสระ

ยังมีคำจำกัดความที่ซับซ้อนและมากกว่านี้ซึ่งล้วนขึ้นอยู่กับมุมมองของผู้เขียน Kanchanasaratool และ Williamson ในปี 2002 กล่าวว่าระบบ Tensegrity คือ การเชื่อมโยงที่เสถียรของชิ้นส่วนที่รับน้ำหนักตามแกน การเป็นโครงสร้าง Tensegrity ของลำดับชั้น k เปรียบเสมือนกับการที่ชิ้นส่วนที่มีการบีบอัดจำนวน k ชิ้นถูกเชื่อมต่อเข้ากับปม หรือ node ตัวอย่างเช่น โครงสร้าง Tensegrity โดยทั่วไปจะอยู่ที่ลำดับชั้นที่ 1 เพราะว่าชิ้นส่วนที่ถูกบีบอัดเพียง 1 ชิ้นที่ทำให้เกิดปม

แอเรียล ฮาเนอร์ อธิบายว่าโครงสร้าง Tensegrity คือ “โครงสร้างเคเบิลที่ใช้การเชื่อมต่อระหว่างจุดแบบมีการคงตัวแบบอิสระและมีการบีบอัดภายใน ซึ่งสายเคเบิลและเอ็นถูกดึงเพื่อต้านระบบของเสาค้ำหรือแท่งรับแรงอัด” ในขณะที่ Miura และ Pellegrino ให้คำอธิบายอย่างคร่าวๆว่า โครงสร้าง Tensegrity คือ โครงสร้างที่มีสายเคเบิลและเสาค้ำ ซึ่งการอัดแรงถูกใส่เข้าไปจากแรงดึงที่ถูกส่งไปยังสายเคเบิลทุกสาย” และเพิ่มเติมอีกว่า “เช่นเดียวกับการส่งแรงดึงไปยังสายเคเบิลทุกเส้น สถานะแรงอัดแรงของเสาค้ำจะทำหน้าที่ให้โครงสร้างมีความมั่นคงและเสถียร”

4.2 ลักษณะโดยทั่วไป

หากคำจำกัดความของ Tensegrity ได้รับการยอมรับแล้วว่ามีความครอบคลุมอย่างเพียงพอ ก็ถึงเวลาที่จะแยก Tensegrity ที่จริงแท้กับไม่แท้จริงออกได้โดยการพิจารณาจากลักษณะดังต่อไปนี้

ระบบ จากความสัมพันธ์ของทฤษฎีในระบบ มันมีส่วนประกอบได้แก่ แรงอัดและแรงดึง โดยโครงสร้างมีความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบที่แตกต่างกัน

สถานะของความเสถียรที่เกิดจากความสมดุลในตัวมันเอง เพราะว่าระบบสามารถสร้างความสมดุลหลังจากที่เสียการทรงตัว และความสมดุลในตัวมันเองเกิดขึ้นได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขภายนอกอย่างอื่น มันมีความเป็นอิสระจากแรงภายนอก หรือแม้แต่แรงโน้มถ่วง

ส่วนวัสดุประกอบ มันอาจจะเป็นเสาค้ำ สายเคเบิล เมมเบรน เป็นต้น

แรงดึงที่ต่อเนื่องและแรงอัดที่ไม่ต่อเนื่อง เพราะว่าส่วนประกอบของแรงอัดจะต้องไม่มีความต่อเนื่องกัน(ไม่สัมผัสกัน) และส่วนประกอบของแรงดึงจะต้องเป็นแรงดึงที่ต่อเนื่องที่เชื่อมต่อกัน

ระบบที่เคร่งครัด นี่คือจุดสำคัญเพราะมันเป็นสิ่งที่ใช้ในการแยกความแตกต่างของโครงสร้างสองประเภท คือโครงสร้างแรงอัด-แรงดึงธรรมดากับโครงสร้าง Tensegrity โดยมีข้อโต้แย้งในระบบบางอย่าง เช่น โครงสร้างรูปทรงห่วงยาง จะถือว่าเป็นโครงสร้างหนึ่งในระบบ Tensegrity หรือไม่

ภาพที่ 23 Octahedron

สิ่งนี้ดูผิวเผินแล้วก็อาจจะเหมือนโครงสร้าง Tensegrity ทั่วๆไป แต่จุดๆนี้ คือสิ่งที่ทำให้เราสามารถพิจารณาได้ว่า "จอร์เจียโดม" ซึ่งเป็นโดมที่ใหญ่ที่สุดในโลกในเมืองแอตแลนต้า คือ Tensegrity ที่ไม่แท้จริง

ภาพที่ 24 Georgia Dome

Illustration taken from Setzer (1992)

ภาพที่ 25 Georgia Dome

Detail of the compressed ring.

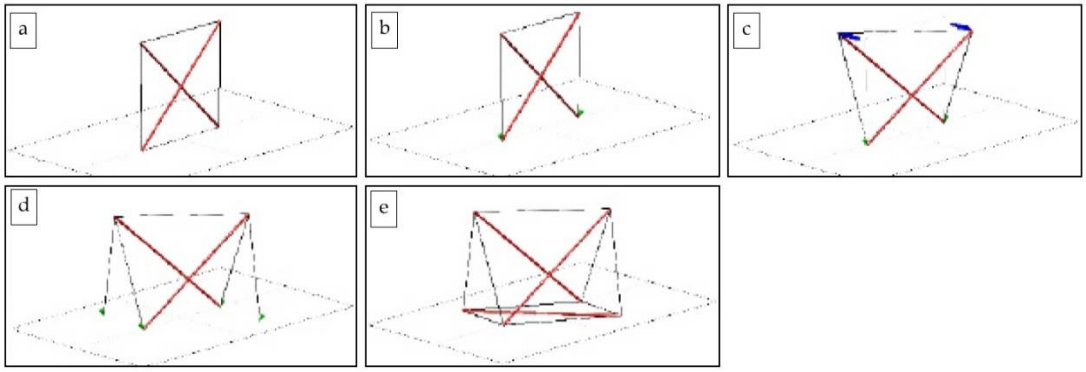
เมื่อพิจารณาอย่างถี่ถ้วนแล้ว โดมแห่งนี้จะไม่ถือว่าเป็นงานระบบ Tensegrity เนื่องจากตัววงแหวนรอบนอกที่มีการบีบอัดล้อมรอบตาข่ายเคเบิลและเสาค้ำนั่น มันหมายถึงว่า ตัวมันทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนที่รับแรงอัดที่มีลักษณะการรับแรงแบบต่อเนื่อง จึงไม่ถือว่าเป็นโครงสร้างนี้ เป็นโครงสร้างระบบ Tensegrity

4.3 กฎพื้นฐาน

ตั้งแต่กลางศตวรรษที่ 20 เป็นที่ยอมรับกันว่า Tensegrity เป็นกฎโครงสร้างเฉพาะที่ใหม่หนึ่งในแง่มุมที่เด่น คือ ความสมดุลที่น่าประหลาดใจและไม่ค่อยเป็นที่เข้าใจนัก ในเรื่องของเสาค้ำที่สามารถลอยตัวอยู่ในอากาศ โดยที่เสาพวกนี้สามารถคงรูปอยู่ในตำแหน่งที่ติดกับสายลวดได้อย่างไร

4.3.1. การวิเคราะห์ความสมดุล

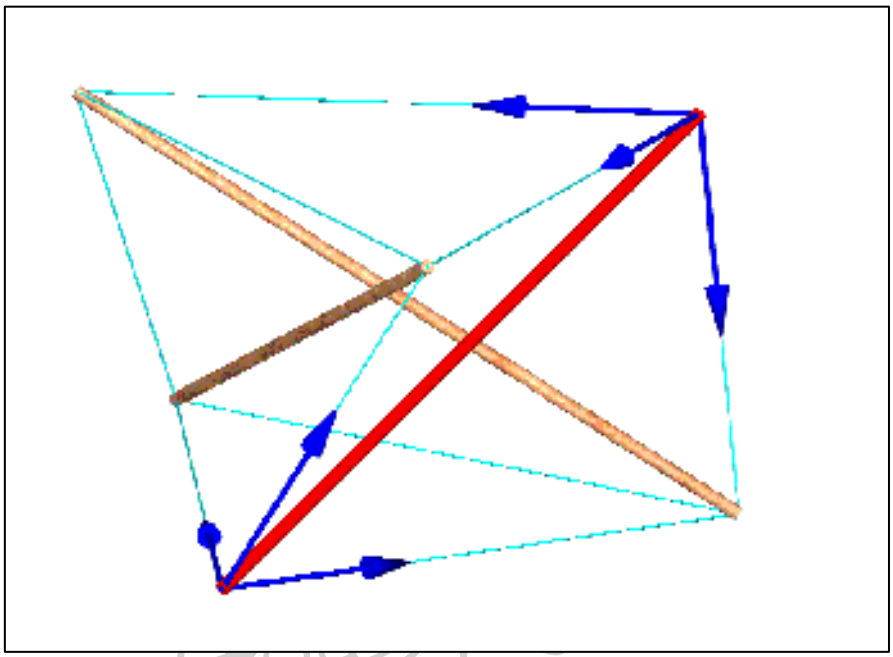
เมื่อได้อธิบายตัวอย่างแบบพื้นฐานของ Tensegrity ว่าถูกสร้างขึ้นได้อย่างไร รวมถึงการหาแนวคิดของกฎ เพื่อที่จะใช้ในการควบคุม



ภาพที่ 26 Author’s derivation of the “Simplex”

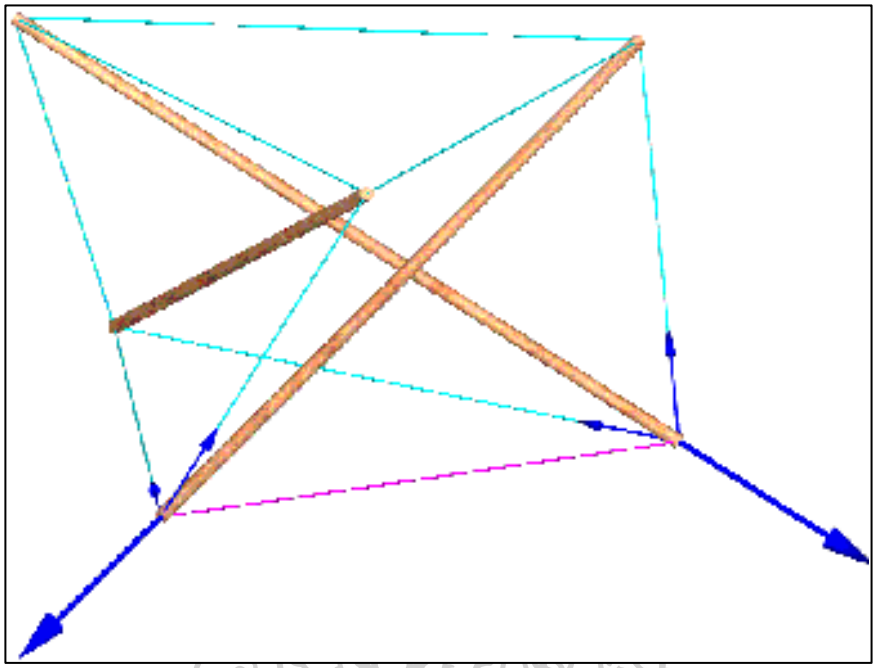
เพื่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของความสมดุลด้วยตัวมันเองของระบบ *แรงดึงที่ต่อเนื่องและแรงกดอัดที่ไม่ต่อเนื่อง* มันจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นในการวิเคราะห์แรงอัดและแรงดึงที่ทำหน้าที่ในแต่ละจุด อีกทั้งแรงทั้งสองยังต้องสมดุลกันเพื่อที่จะทำให้โครงสร้างมีความเสถียร ซึ่งบางครั้งการศึกษากลศาสตร์อาจจะมีความซับซ้อนเนื่องด้วยเรขาคณิตและ

จำนวนองค์ประกอบของโครงสร้าง จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำให้งานนี้สำเร็จได้



ภาพที่ 27 Set of forces acting on a strut.

ภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงแรงที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์นี้ เสาแต่ละต้นสามารถอยู่ได้ด้วยแรงดึงจากจากสายเคเบิลแต่ละเส้น เนื่องจากมันเป็นระบบสามมิติ ที่ปลายของเสาแต่ละตัวควรจะมีสายเคเบิล 3 เส้นติดอยู่ผลลัพธ์ของแรงสามจุดในแต่ละปมที่ถูกใส่เข้าไปกับปลายเสาทั้งสองด้าน จะต้องอยู่ในทางเดียวกันกับแกนของเสา มิเช่นนั้นจะไม่ก่อให้เกิดความสมดุล เหมือนเราใช้นิ้วชี้และนิ้วโป้งจับที่ปลายไม้จิ้มฟันแต่ละด้านให้ไม่หลุดมือ แรงจากนิ้วทั้งสองที่มากระทำลงบนปลายไม้จิ้มฟันจะเป็นในลักษณะทิศทางตามแกนความยาวของไม้จิ้มฟันตัวนั้น



ภาพที่ 28 Set of forces acting on a cable.

หรือเหตุผลเดียวกันสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับเส้นลวดในภาพที่ 4.9 ซึ่งถูกผูกเข้ากับปลายของเสาทั้งสองต้น และได้รับอิทธิพลจากแรงดึงในสายเคเบิลอย่างน้อยสองเส้นในแต่ละปม ผลที่ได้ก็คือ เส้นลวดแต่ละเส้นจะอยู่ในสภาวะสมดุลถ้ามันอยู่ภายใต้แรงดึงที่เหมาะสม

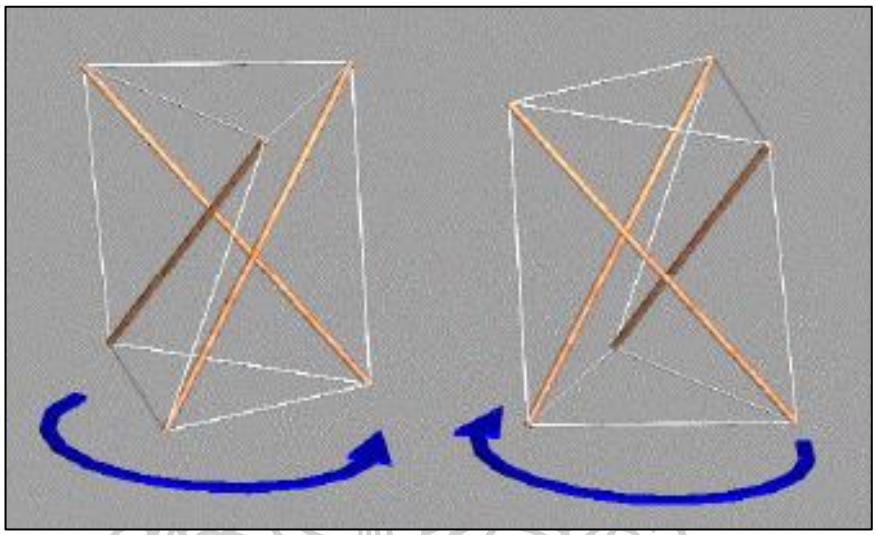
4.4 โครงสร้างหลัก

ด้วยรายละเอียดองค์ประกอบของโครางสร้าง Tensegrity ทำให้เกิดการยอมรับข้อสรุปว่าพวกมันมีลักษณะที่พิเศษ โดยต่อจากนี้ จะมีการอธิบายให้เข้าใจถึงข้อดีและข้อเสียของโครงสร้างชนิดนี้

4.4.1. คุณลักษณะทั่วไป

- โครงสร้างมีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างชนิดอื่นๆที่มีแรงอัดและแรงดึงที่คล้ายๆกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ โครงสร้างนี้มีความต้านทานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างอื่นที่มีน้ำหนักเบาคล้ายๆกัน

- โครางสร้างเหล่านี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับแรงโน้มถ่วงของโลกเนื่องจากมันมีความเสถียรในตัวมันเอง ดังนั้นมันไม่จำเป็นต้องถูกปัก,ยึดหรือตั้งแนบขนานกับพื้นผิว ระบบเหล่านี้มีความเสถียรในทุกตำแหน่ง แรงโน้มถ่วงซึ่งเป็นพื้นฐานของสถาปัตยกรรมแบบปัจจุบันไม่มีผลกับโครงสร้างลักษณะนี้ (Perlberg, 1977)



ภาพที่ 29 Right-handed and Left-handed Simplex
(dextrorse and Sinistrorse)

- โครงสร้างส่วนใหญ่ของ Tensegrity เป็นโครงสร้างที่เปรียบเสมือนกับ enantiomorphic หมายถึง โครงสร้างในหน่วยย่อยเข้ามาประกอบกัน มันจะอยู่ด้วยกันในลักษณะคู่ที่สะท้อนกลับด้านเข้าหากันจากด้านซ้ายและด้านขวา ดังเช่น dextrorse and Sinistrorse ตามลำดับ
- โครงสร้างแบบโมดูลของ Tensegrity สามารถเชื่อมต่อกันเพื่อสร้างเป็นเสากระโดง หรือเป็บกริดตาราง รวมถึงกลุ่มก้อนในรูปแบบที่เหมือนกันหรือแตกต่างกันออกไป
- ถ้าแรงบีบอัดในตัวมันเองค่อนข้างสูงในโครงสร้าง Tensegrity ความสามารถในการรับน้ำหนักก็จะสูงตามไปด้วยเช่นกัน

- โครงสร้างนี้มีคุณสมบัติของการทำงานร่วมกันซึ่งพฤติกรรมทั้งหมดของระบบไม่สามารถคาดเดาได้จากพฤติกรรมขององค์ประกอบใดๆที่นำมาใช้แบบแยกส่วนกัน (ฟูลเลอร์, 75; เลอร์วิน ,82)
- ความยืดหยุ่นหรือความแข็งของโครงสร้างขึ้นอยู่กับวัสดุที่ถูกนำมาใช้ และวิธีการในการประกอบ
- โครงสร้างเหล่านี้มีความสามารถในการตอบสนองต่อองค์ประกอบทั้งหมด เพราะแรงจะถูกถ่ายโอนไปทั่วทั้งโครงสร้างอย่างทั่วถึง
- การตอบสนองต่อน้ำหนักไม่ได้เป็นลักษณะทางตรง โครงสร้างเหล่านี้มีความยืดหยุ่นภายใต้น้ำหนักที่เบา แต่ความแข็งของมันจะเพิ่มสูงอย่างทันทีที่มีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น เฉกเช่นกับสะพานแขวน

4.4.2 ข้อดีของโครงสร้าง

- จากโครงข่ายของแรงดึงที่มีอยู่ทุกทิศทาง ทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวที่ห่อหุ้มแรงอัด ดังนั้นโครงสร้างจึงมีความยืดหยุ่นแต่ก็ยังคงความเสถียรไว้ในตัวได้เช่นกัน
- เนื่องด้วยความสามารถดึงทุกศักยภาพในตัวโครงสร้าง จึงทำให้ Tensegrity เป็นโครงสร้างที่ใช้วัสดุน้อย แต่ให้ความแข็งแรงที่มาก
- จากความจริงที่ว่าโครงสร้างเหล่านี้สั่นอย่างทันทีทันใดเมื่อมีแรงมากระทำ มันหมายถึงว่า โครงสร้างพวกนี้มันสามารถถ่ายโอนน้ำหนักได้อย่างทันที ดังนั้น สิ่งนี้มีประโยชน์ในแง่ของการรับการสั่นสะเทือนและการสั่นสะเทือนที่มาจากแผ่นดินไหว โครงสร้างเหล่านี้จึงมีความเหมาะสมที่จะเข้าไปจัดการในพื้นที่ที่มีปัญหาเรื่องแผ่นดินไหว

4.4.3 ข้อด้อย

- ความซับซ้อนของการประดิษฐ์ก็เป็นอุปสรรคในการพัฒนาโครงสร้างที่ Tensegrity รวมถึงการนำมาสู่ปัญหาในการก่อสร้างอีกด้วย
- อุปกรณ์และเครื่องมือในการออกแบบที่ยังมีไม่มากพอหรือมีอยู่จำกัด ทำให้เกิดอุปสรรคการออกแบบและเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างเหล่านี้
- การที่จะทำให้ครงสร้างสามารถรองรับน้ำหนักได้มากๆ จะต้องใช้แรงอัดที่มีกำลัง ซึ่งในกรณีงานก่อสร้างขนาดใหญ่จะมีความยากในการก่อสร้าง

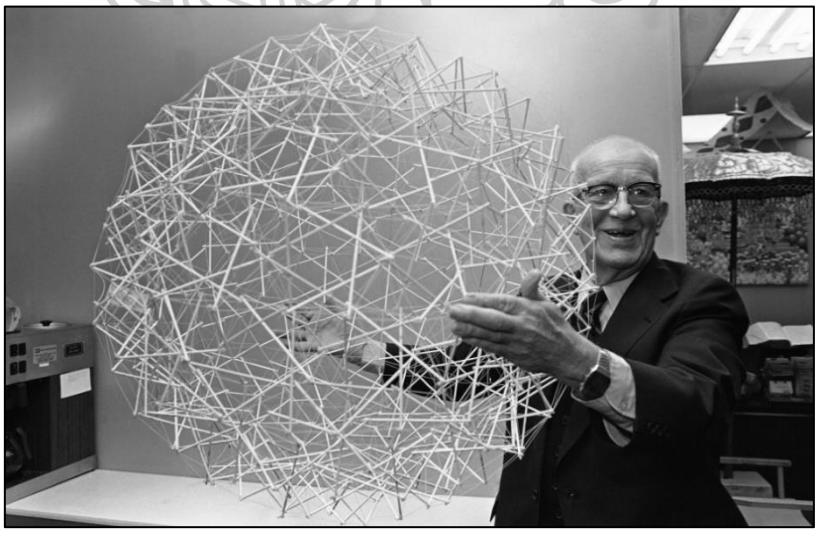
บทที่ 5

การจัดกลุ่มแบ่งประเภท

สิ่งสำคัญในการพัฒนาความรู้ในสาขาใหม่นั้นคือ การอธิบาย กำหนด และแบ่งประเภทเพื่อพัฒนาจัดแบ่งประเภทให้สมบูรณ์และสามารถขยายหัวข้อคำถามได้ เช่นเดียวกัน Tensegrity ที่อย่างไรก็ตาม การจัดแบ่งประเภทในปัจจุบันยังคงมีความขัดแย้งและข้อมูลที่ไม่ตรงกันซึ่งล้วนมาจากผู้เชี่ยวชาญหลายๆที่ แต่ในวิทยานิพนธ์เล่นนี้จะนำเสนอการจัดแบ่งประเภทตามความคิดเห็นของผู้แต่งเอง โดยพิจารณาจากทิศทางการขยายตัวของรูปแบบฟอร์มโครงสร้างเป็นหลัก

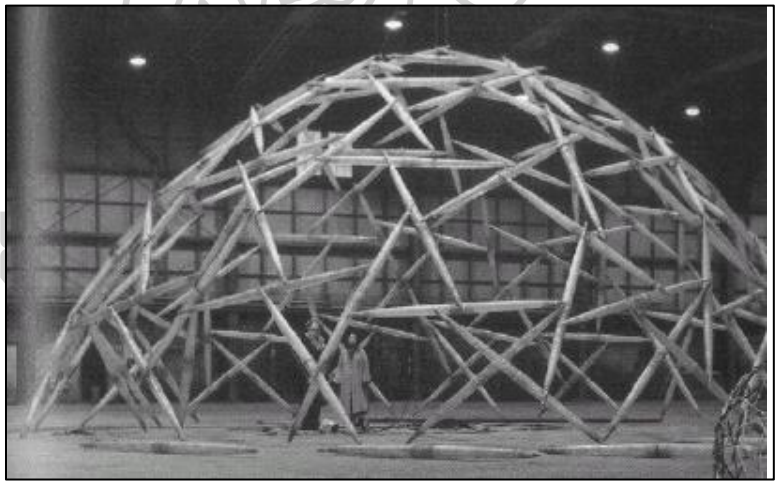
5.1 ระบบโดม

ระบบเหล่านี้ถือว่ามีรูปทรงเป็นทรงกลม เพราะเมื่อทำการต่อองค์ประกอบยูนิตย่อยเข้าไปจนครบระบบหรือต่อไปเรื่อยๆจนระบบครบเต็มไม่สามารถเพิ่มยูนิตย่อยเข้าไปได้อีก รูปทรงที่เกิดขึ้นจะได้เป็นทรงกลม และรูปแบบของยูนิตย่อยที่เข้ามาประกอบกันจะเป็นรูปทรงพื้นฐาน (Geodesic) ยกตัวอย่างผลงานของ บัคมินสเตอร์ ฟูลเลอร์



ภาพที่ 30 buckminster fuller

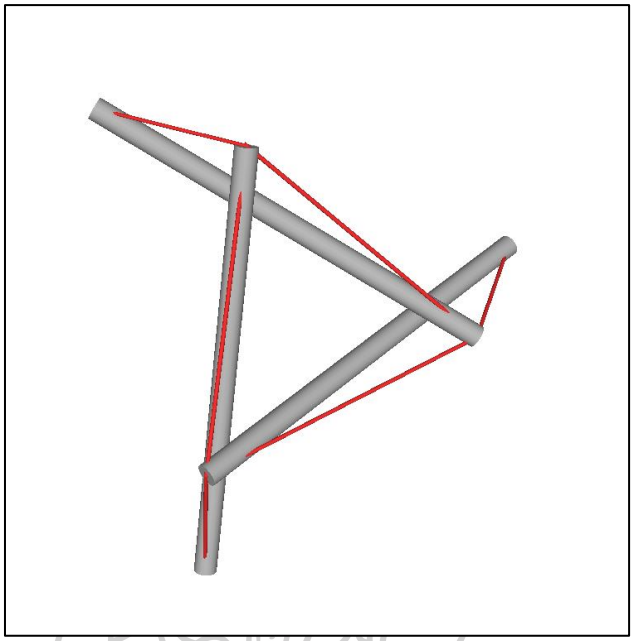
ภาพที่ 31 U.S. Pavilion for Expo ‘67



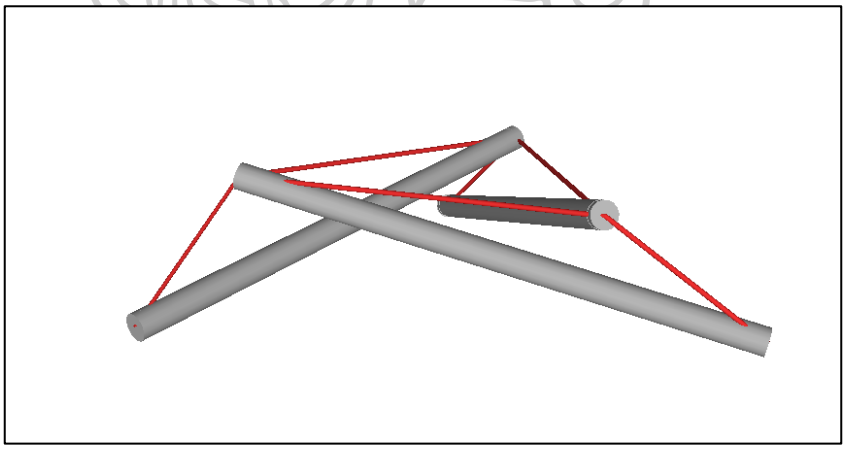
ภาพที่ 32 Geodesic Tensegrity Dome

โดย Tensegrity ประเภทนี้จะมีคุณลักษณะของการกระกอบตัวหรือการเชื่อมต่อกันของแต่ละยูนิตที่มีลักษณะการยึดโยงกันที่เป็นแบบแผ่นผืนช่วยกันดึง ด้วยเหตุนี้ Tensegrity ระบบโดมจึงจำเป็นจะต้องมีรูปทรงที่เป็นทรงกลมเพราะต้องอาศัยแรงที่คอยบีบรัดโดยทั่วกัน เพื่อดันตัวให้โครงสร้างสามารถคงรูปทรงตัวอยู่ได้

5.1.1 ยูนิตย่อยของ Tensegrity ระบบโดม



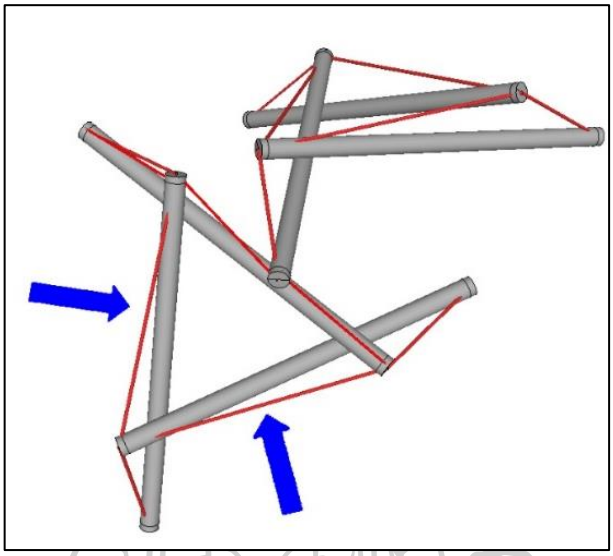
ภาพที่ 33 ยูนิตย่อยของ Geodesic Tensegrity Dome



ภาพที่ 34 ยูนิตย่อยของ Geodesic Tensegrity Dome

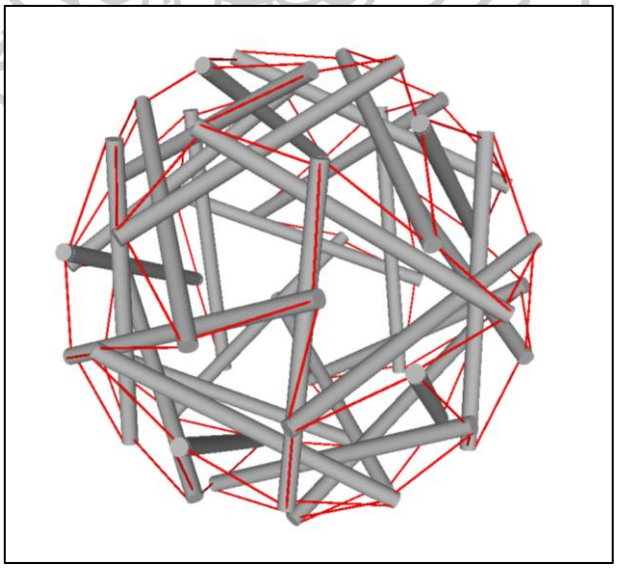
จากภาพที่แสดงยูนิตย่อยของ Tensegrity ประเภทโดม ประกอบไปด้วยแรงดึงและเสารับแรงอัด 3 เสาเมื่อเส้นสีแดงคือเส้นที่ทำหน้าที่บีบรัดเสาสีเทา จึงทำให้โครงสร้างโดยรวมของยูนิตย่อยเกิดการดันตัวเองขึ้นมาจากเสาทั้ง 3 เสาที่โดยแรงอัดเข้ามากระทำ

5.1.2 การเชื่อมต่อของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบโดม



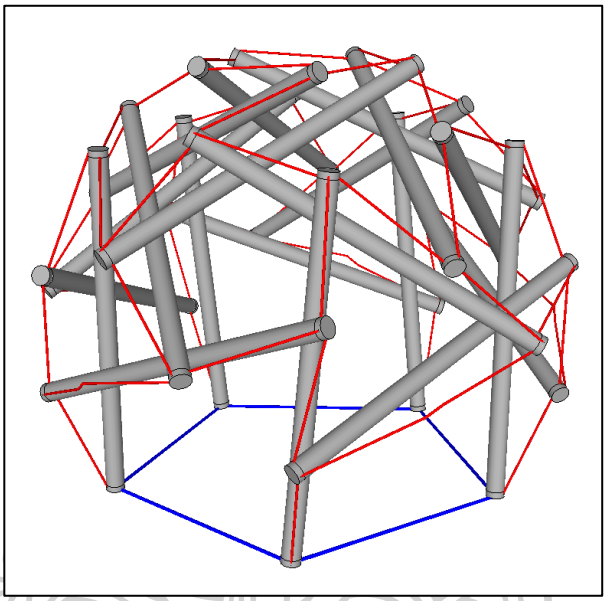
ภาพที่ 35 **การต่อยูนิตย่อยเข้าด้วยกัน Geodesic Tensegrity Dome**

โดยการเชื่อมต่อของแต่ละยูนิตย่อยจะเข้ามาเชื่อต่อกันตรงจุดเครื่องหมายสีน้ำเงิน โดย Tensegrity ประเภทนี้ ใน 1 ยูนิตจะสามารถเชื่อมต่อกับยูนิตอื่นอีก 3 ตัว และเมื่อทำการเชื่อมต่อยูนิตไปเรื่อยๆ โครงสร้างโดยรวมจะวนครบมาเป็นรูปทรงกลม ด้วยทิศทางฮงศาความโค้งของการดันตัวจากเสาสีเทาในแต่ละยูนิต



ภาพที่ 36 **Geodesic Tensegrity Dome**

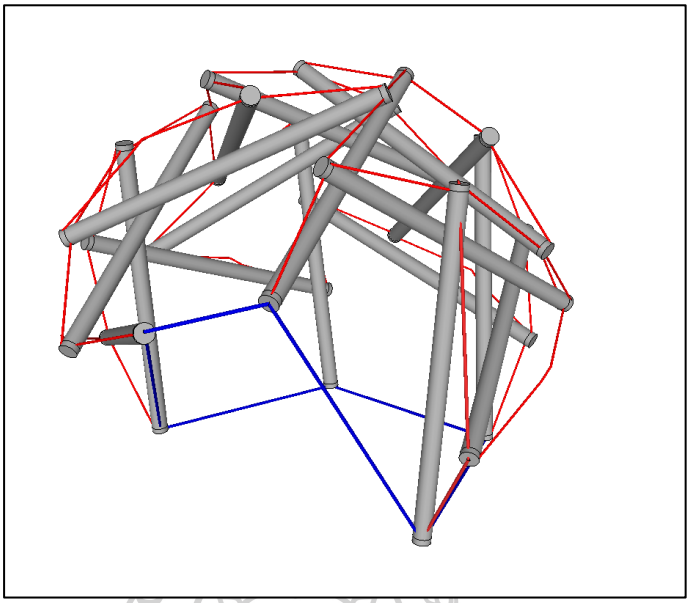
เช่นเดียวกับรูปภาพที่ 32 โครงสร้างเป็นรูปทรงโดม เกิดจากการต่อยูนิตย่อยที่ไม่เต็มครบเต็มระบบเป็นทรงกลม โดยวิธีการต่อเป็นทรงโดมหรือครึ่งของทรงกลม โดยปกติแล้วโครงสร้างโดยรวมจะไม่สามารถคงรูปหรือพยุงตัวเองได้ อันเนื่องมาจากขาดแรงบีบรัดรอบโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องอาศัยแรงดึงจากเส้นสีน้ำเงินตามภาพตัวอย่างด้านล่างที่เป็นจุดที่ทำให้โครงสร้างสามารถดันตัวขึ้นไปได้



ภาพที่ 37 **Geodesic Tensegrity Dome**

5.1.3 จุดเด่นจุดด่อยของ Tensegrity ระบบโดม

ความสามารถในการโอบล้อมปกคลุมพื้นที่ในเชิง space ของ Tensegrity ประเภทนี้ ถือว่าเป็นจุดเด่นที่สำคัญโดยเฉพาะกับพื้นที่ในลักษณะปิด (end closure space)



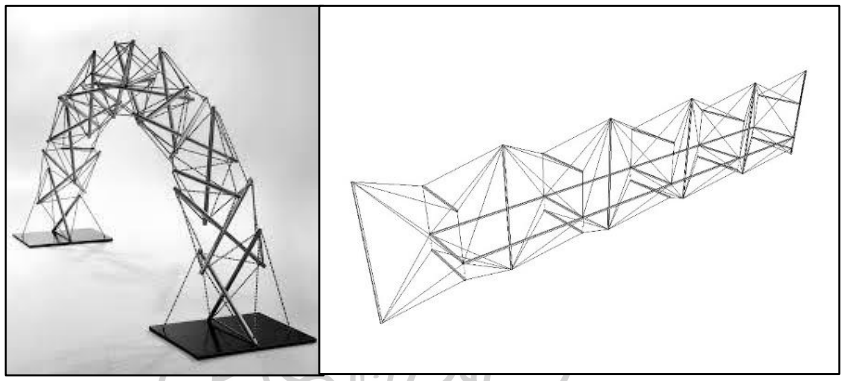
ภาพที่ 38 **Geodesic Tensegrity Dome**

แต่ Tensegrity ระบบโดม ก็มีข้อแม้ของวิธีการต่อยูนิตย่อย จากรูปภาพที่ 38 จะเห็นได้ว่าเสาด้านล่างโครงสร้างที่ทำหน้าที่ยกโครงสร้างทั้งหมดขึ้นจากพื้นมี 4 เสา จากรูปภาพก่อนหน้าที่ 5.7 ที่มี 5 เสา โดยกรณีนี้ เราจะทำการถอดยูนิตย่อยบริเวณขาโครงสร้างที่เชื่อมต่อกับพื้นออกไป 1 ยูนิต และถึงแม้จะมีเส้นสีน้ำเงินที่เป็นตัวคอยบีบรัดให้โครงสร้างรักษาแรงดันของตัวเอง แต่ก็ไม่อาจรักษาความสเถียรของโครงสร้างไว้ได้ รวมไปถึงการรักษารูปแบบฟอร์มของโครงสร้างที่ผิดเพี้ยนไปจากการขาดความความสุมดุลอันเนื่องมาจาก “การต่อยูนิตไม่ครบระบบ”

กล่าวคือ เมื่อการต่อยูนิตย่อยที่ไม่มีความสมมาตรกัน จึงส่งผลทำให้แรงดึงในเชือกเส้นสีน้ำที่ทำกับปลายเสามีค่าไม่เท่ากัน เมื่อแรงแต่จุดที่ไม่เท่ากันนี้ ถูกส่งต่อเนื่องไปยังส่วนอื่นๆของโครงสร้าง ความสมดุลที่เกิดจากการหักล้างกันของแรงจึงไม่เกิดขึ้น โครงสร้างจึงขาดความสเถียรภาพไม่อาจรักษาสมดุลได้เต็มประสิทธิภาพเหมือนดังเดิม

5.2 ระบบเส้น

ระบบเหล่านี้ถือว่ามีรูปทรงที่เป็นเส้น เพราะ Tensegrity ประเภทนี้มีลักษณะการเชื่อมต่อของยูนิตย่อยแบบมีทิศทาง ซึ่งจะแตกต่างกับระบบโดมที่มีลักษณะของการเชื่อมต่อของยูนิตย่อยเป็นแบบแผ่นผืน โดยโครงสร้างในหน่วยยูนิตย่อยของ Tensegrity ประเภทนี้จะมีมิติของการรักษารูปทรงได้มากกว่า Tensegrity แบบโดม กล่าวคือ Tensegrity ประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องต่อให้ครบระบบก็สามารถทรงตัวคงรูปอยู่ได้ด้วยความสเถียร



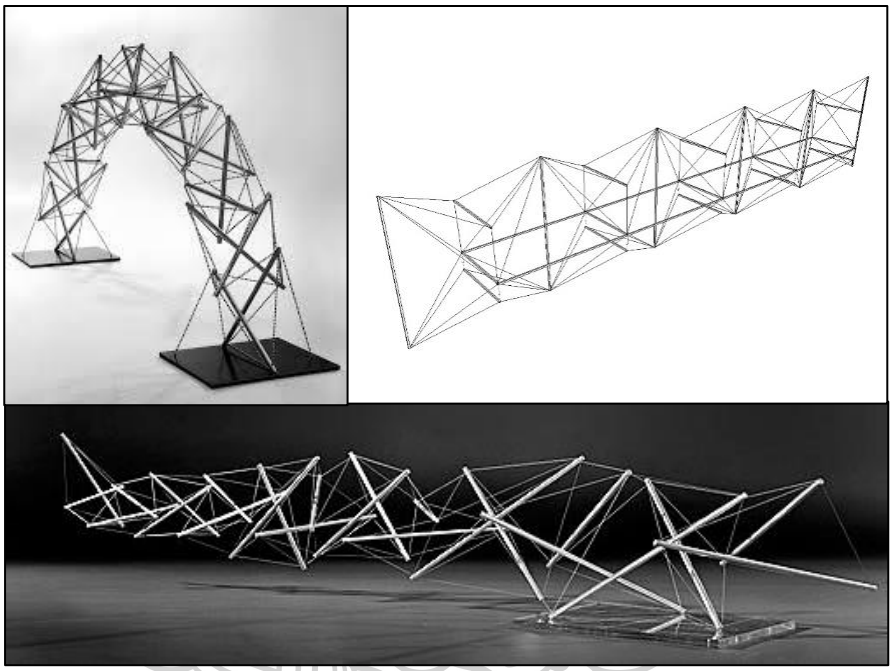
ภาพที่ 39 Tensegrity ระบบเส้น

ลักษณะการเชื่อมต่อของยูนิตย่อยจะใช้วิธีคล้ายกับการดีดตัวเพื่อเพิ่มระยะ ดังนั้น Tensegrity ประเภทนี้จึงต้องมีทิศทางของแรงดีดตัวเพื่อการถ่ายแรงให้กระจายไปได้ทั่วถึงทั้งโครงสร้าง จึงทำให้รูปลักษณ์โดยรวมของโครงสร้างมีลักษณะเป็นเส้น และบุคคลที่ถือว่ามีอิทธิพลมากกับ Tensegrity ประเภทนี้คือ เค็นเน็ธ สเนลสัน

ภาพที่ 40 Kenneth Snelson

แม้ผลงานของเขาทั้งหมดจะเป็นไปในทางงานสายประติมากรรม แต่ในชุดความคิดของงานต้นแบบแต่ละตัวของเขาที่ได้ออกแบบขึ้นมา ถือเป็นสิ่งสำคัญในการนำแนวคิดนี้ไปพัฒนาต่อยอดเป็น Tensegrity ในทางสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม

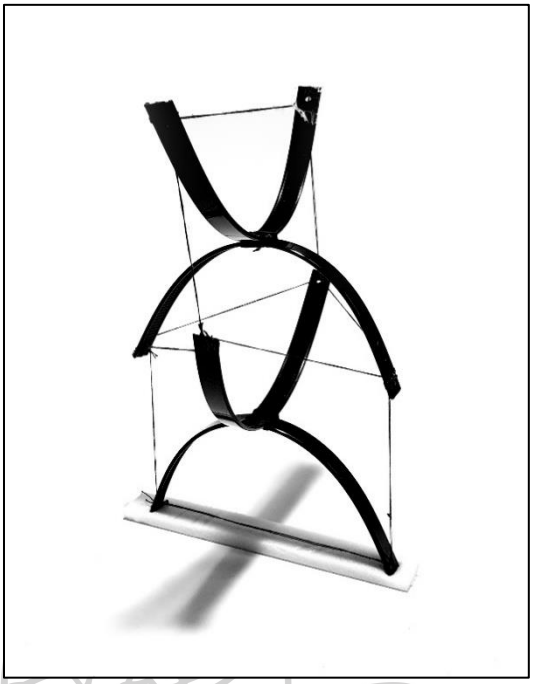
5.2.1 ความหลากหลายของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบเส้น



ภาพที่ 41 Tensegrity ระบบเส้น

ยูนิตย่อยของ Tensegrity ระบบเส้นสามารถจะมีได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งขนาดหรือทิศทางการการต่อตัว แต่ทั้งหมดยังคงตั้งอยู่บนพื้นฐานของการบีบอัดแรงเพื่อดีดตัวในการเพิ่มระยะความยาวของโครงสร้าง ซึ่งแรงการกระจัดภายในโครงสร้างทั้งหมดจะวิ่งเป็นแนวตามทิศทางของโครงสร้างอย่างชัดเจน

5.2.2 การเชื่อมต่อของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบเส้น



ภาพที่ 42 Tensegrity ระบบเส้น

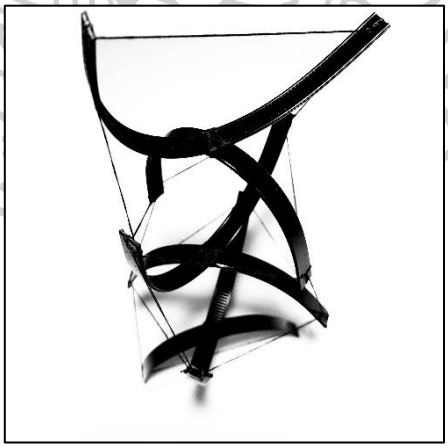
เมื่อพิจารณาเข้าไปในยูนิตย่อยของ Tensegrity ระบบเส้น จะมีหลักการทำงานพื้นฐานเบื้องต้นคือ การใช้หลักการแรงดึงต่อเนื่องและแรงอัดมาประกอบกันตามนิยามของ Tensegrity ตามปกติ แต่จุดที่สำคัญของ Tensegrity ระบบนี้คือลักษณะของการเชื่อมต่อยูนิตย่อยเข้าด้วยกัน โดย Tensegrity ระบบเส้นจะมีลักษณะทางความเป็น 3 มิติ มากกว่าระบบโดมที่เป็นเหมือน 2 มิติ เพียงหนึ่งหน่วยยูนิตย่อยของ Tensegrity ระบบเส้น ก็สามารถที่จะคงรูปอยู่ได้และมีความสเถียรสมบรูณ์ ในการกรณีการเพิ่มจำนวนยูนิต ยูนิตที่เพิ่มขึ้นมาจะวิธีการเข้ามาประกอบกับยูนิตเดิมด้วยการใช้วิธีเหมือนการวางทับยูนิตตัวเก่า จากนั้นเส้นที่รับแรงดึงในแต่ละยูนิตจะมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ทำให้ยูนิตทั้งสองเชื่อมต่อเป็นโครงสร้างชิ้นเดียวกันและทำอย่างนี้ต่อไปเรื่อยๆกับยูนิตที่เพิ่มเข้ามาใหม่

5.2.3 การควบคุมทิศทางของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบเส้น

ภาพที่ 43 Tensegrity ระบบเส้น

อีกหนึ่งความสามารถของ Tensegrity ระบบเส้น คือการกำหนดทิศทางของการต่อเพิ่มจำนวนยูนิตย่อยได้ โดยในหัวข้อนี้จะแบ่งการควบคุมทิศทางของ Tensegrity ระบบเส้นออกเป็น 2 แบบ คือ 1.การบิดหมุน 2.การเลี้ยว ซึ่งการควบคุมทั้ง 2 แบบนี้ คือสวนสำคัญที่ต้องใช้ร่วมกันในการที่จะบังคับควบคุม Tensegrity ระบบนี้

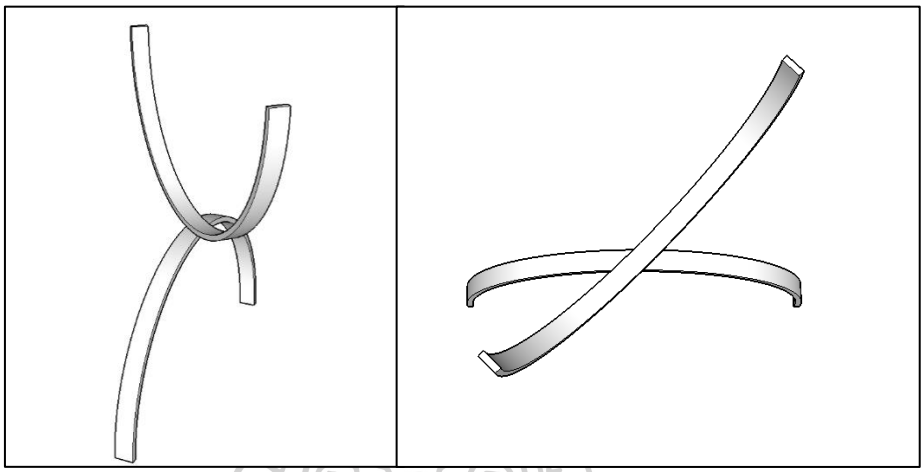
5.2.3.1 การควบคุมทิศทางการบิดหมุนของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบเส้น



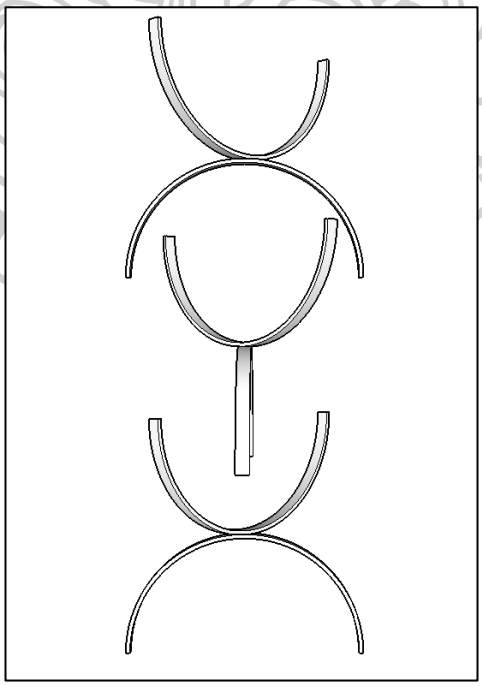
ภาพที่ 44 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น

การบิดหมุนของ Tensegrity ระบบเส้น คือการที่องศาของแนวแกนโครงสร้างโดยรวมเปลี่ยนไป แต่ยังคงมีทิศทางจากหัวถึงปลายโครงสร้างเหมือนเดิม

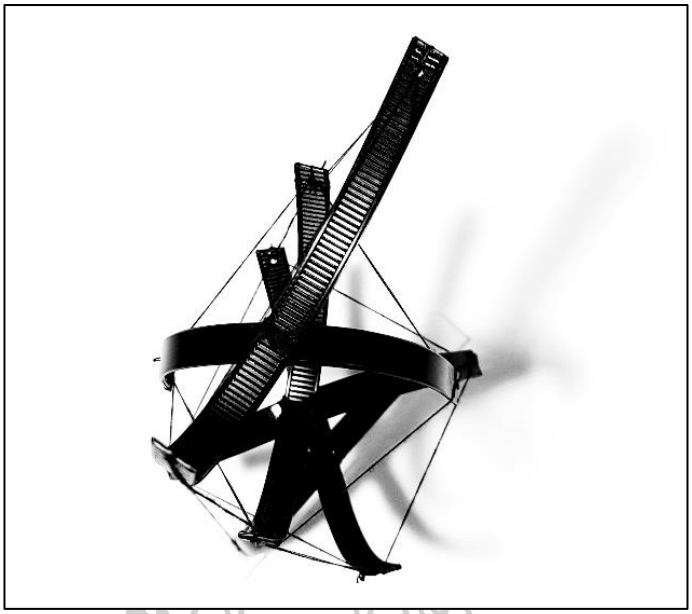
โดยการบิดหมุนของตัวยูนิตจะใช้วิธีการกำหนดองศาระหว่างชิ้นส่วนที่รับแรงอัดภายในหน่วยยูนิตด้วยกัน ให้ทำมุมกันแล้วเกิดรูปทรงที่ไม่สมมาตรกัน



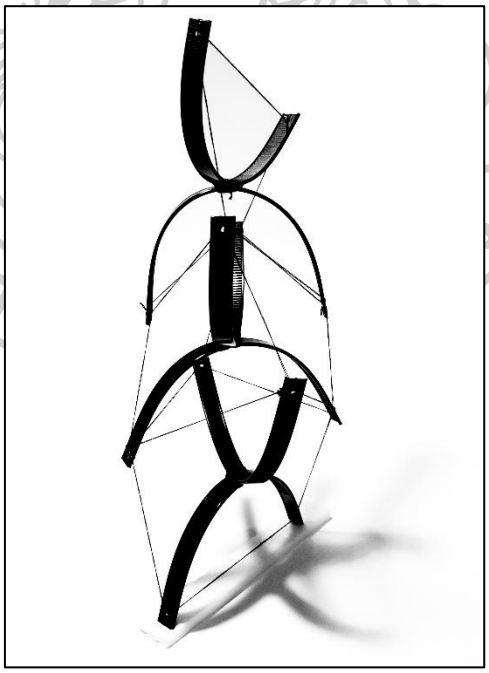
ภาพที่ 45 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น



ภาพที่ 46 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น

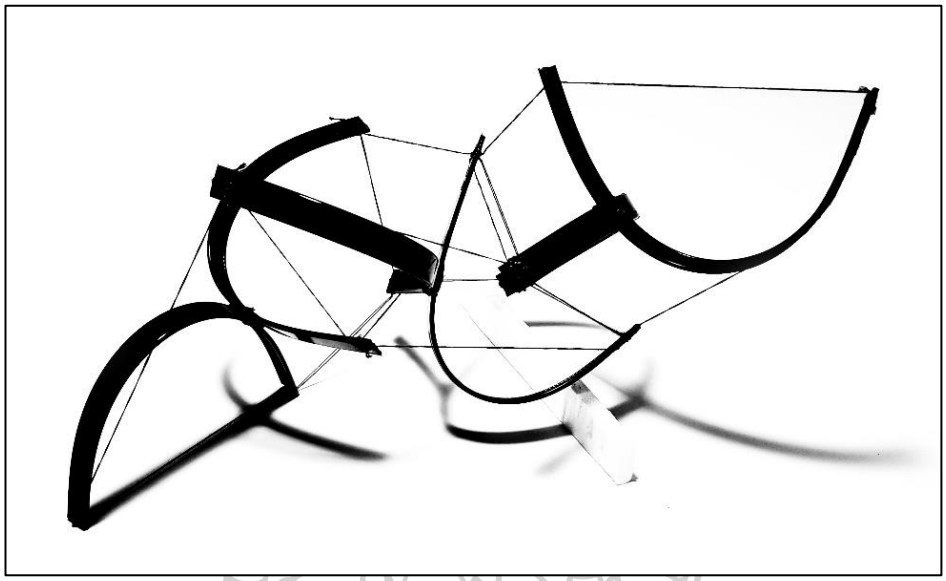


ภาพที่ 47 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น



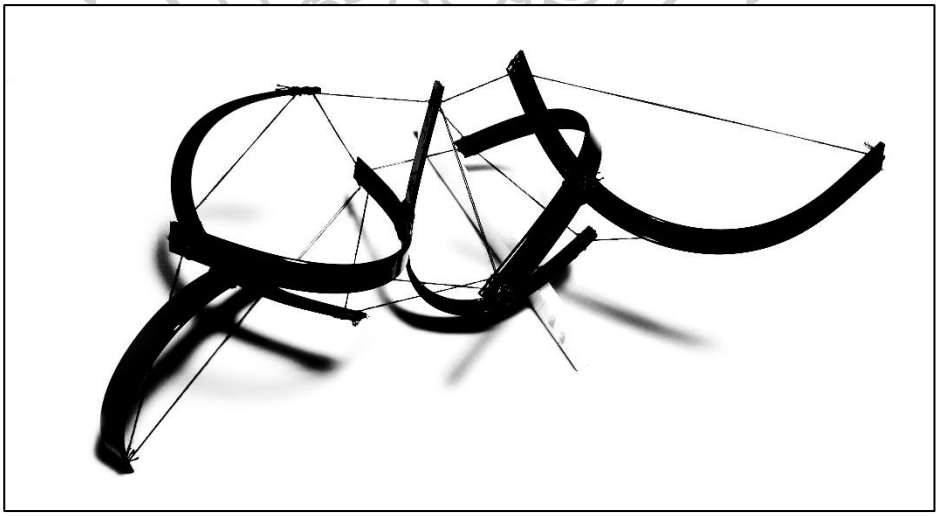
ภาพที่ 48 การบิดหมุน Tensegrity ระบบเส้น

5.2.3.2 การควบคุมทิศทางการเลี้ยวของยูนิตย่อย Tensegrity ระบบเส้น



ภาพที่ 49 การเลี้ยวของ Tensegrity ระบบเส้น

การเลี้ยวของ Tensegrity ระบบเส้น คือการที่ทิศทางจากตำแหน่งของยูนิตที่เพิ่มเข้ามาใหม่ไม่อยู่บนแนวแกนเส้นตรงของยูนิตที่เป็นตัวเริ่ม



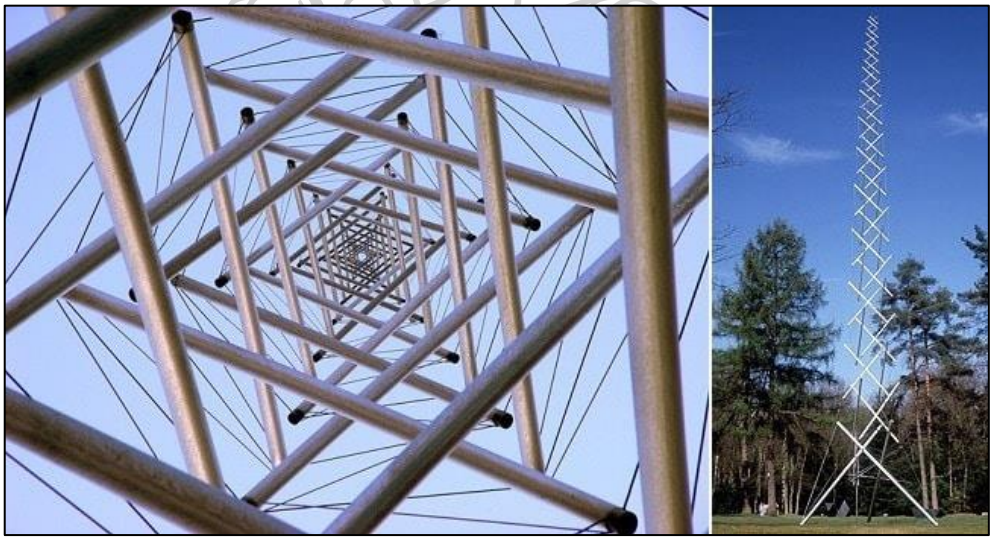
ภาพที่ 50 การเลี้ยวของ Tensegrity ระบบเส้น

โดยการเลี้ยวของตัวยูนิตจะใช้วิธีการกำหนดระยะความยาวชิ้นส่วนที่รับแรงอัดภายในหน่วยยูนิตไม่ให้เท่ากัน จึงทำให้ยูนิตที่เพิ่มเข้าไปใหม่ มีทิศทางหลุดออกจากแนวแกนเดิม

5.2.4 จุดเด่นจุดด่อยของ Tensegrity ระบบเส้น

จากคุณลักษณะของการเชื่อมต่อยูนิตที่มีความหลากหลายทางมิติการเชื่อมต่อ (เกิดแรงดึงของเส้นเชือกกับเสารับแรงอัดหลายทิศทาง) ทำให้โครงสร้างระบบนี้มีความแข็งแรง และด้วยคุณสมบัตินี้ จึงทำให้ Tensegrity ระบบเส้น มีความเหมาะสมกับงานในลักษณะการพาดช่วงกว้าง ซึ่งการเพิ่ม-ลดจำนวนยูนิตสามารถทำได้เรื่อยๆโดยที่โครงสร้างยังรักษาความสเถียรไว้ได้ สามารถกำหนดทิศทางการบิดหมุนหรือเลี้ยวของโครงสร้างได้

อีกหนึ่งจุดที่ควรเป็นข้อพิจารณาในการเลือกใช้โครงสร้างระบบนี้คือ ขั้นตอนในการประกอบติดตั้งที่มีความซับซ้อนและยากในการจัดชิ้นส่วนให้เข้ารูป โดยเฉพาะงานที่เกี่ยวกับการรับน้ำหนักมากๆ

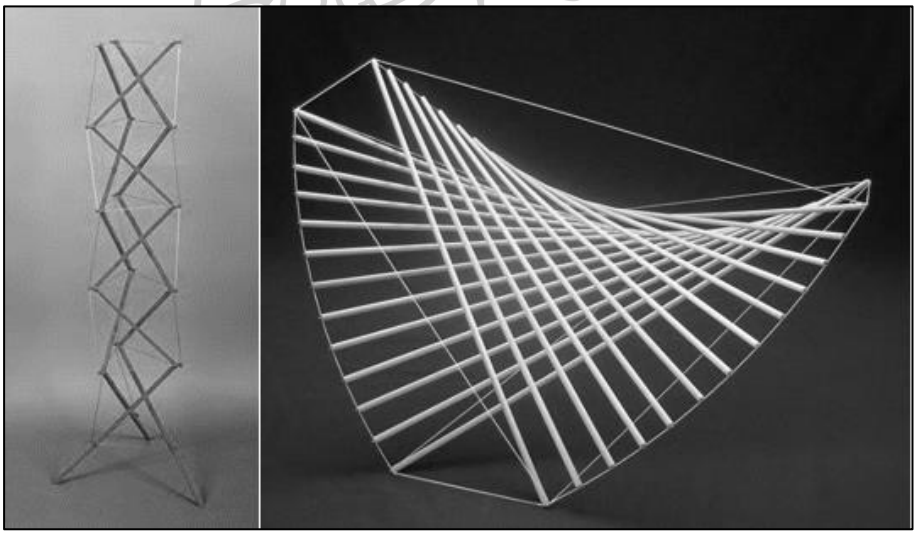


ภาพที่ 51 Tensegrity ระบบเส้น

5.3 ระบบเดี่ยว

Tensegrity ระบบนี้ถือเป็นระบบที่มีความซับซ้อนในโครงสร้างน้อยที่สุด เข้าใจได้ง่าย เป็นระบบที่จบภายในตัวเอง กล่าวคือ ทั้งระบบจะมีเพียงแค่ยูนิตย่อยยูนิตเดียว ส่วนการเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนหรือการขยายขนาดจะกระทำภายในชุดโครงสร้างแรงดึงชุดเดียวกัน การเพิ่มจำนวน ณ ที่นี้ คือการเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนที่รับแรงอัดเพิ่มเข้าไปในโครงสร้างชุดเดียวกัน และมีวิธีการในการรับแรงอัดในแนวแรงเดียวกัน ด้วยคุณสมบัตินี้ข้าพเจ้าจึงขอเรียกชื่อ Tensegrity ระบบนี้ว่า Tensegrity ระบบเดี่ยว อันเนื่องมาจากการใช้รูปแบบการซ้ำในการเพิ่มจำนวนของชิ้นส่วนรับแรงอัด ภายในโครงสร้างตัวเองเพียงชุดเดียว ซึ่งผลงานโดยมากของ Tensegrity ระบบนี้ จะเป็นไปในทางสายงานสายประติมากรรมหรือหุ่นจำลองโครงสร้างเพื่อใช้ศึกษากับผู้ที่เริ่มต้นงาน Tensegrity เพราะระบบที่เข้าใจได้ง่าย

5.3.1 รูปแบบของโครงสร้าง Tensegrity ระบบเดี่ยว



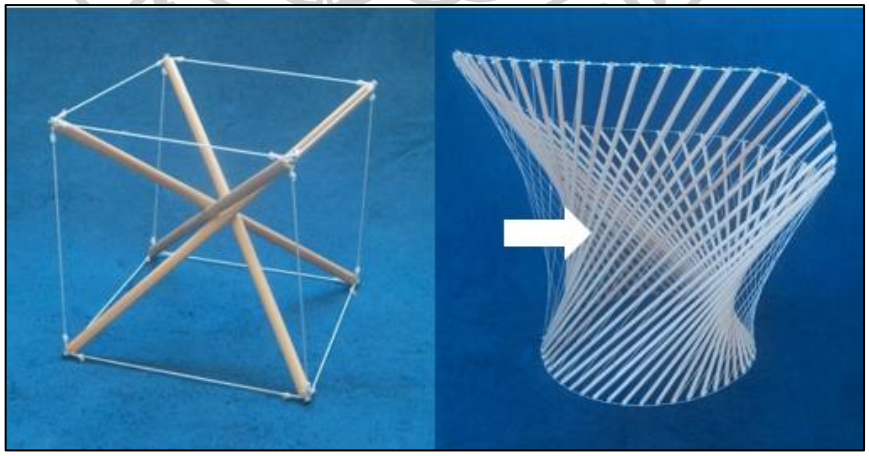
ภาพที่ 52 Tensegrity ระบบเดี่ยว

รูปแบบของโครงสร้าง Tensegrity ระบบเดี่ยวสามารถมีได้หลากหลายรูปแบบ-รูปทรง แต่ทั้งหมดยังต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขสำคัญของการเป็น Tensegrity ระบบเดี่ยว นั่นคือการที่ทั้งโครงสร้างไม่สามารถแบ่งแยกเป็นยูนิตที่มีแรงอัด-แรงดึงต่อเนื่องได้ โดยทั้งโครงสร้างจะมีรูปแบบของการอัด-ดึงแรงที่จบในตัวเพียงชุดเดียว ซึ่งจะแต่กต่างกับ

โครงสร้าง Tensegrity อีก 2 ระบบข้างต้นที่เคยกล่าวมา และไม่ว่าเป็น Tensegrity ระบบโดมหรือ Tensegrity ระบบเส้น ในการขยายขอบเขตโครงสร้างของ Tensegrity ทั้งสองระบบนี้คือการเพิ่มจำนวนยูนิตย่อยเข้าไป แต่สำหรับ Tensegrity ระบบเดี่ยว จะใช้วิธีการเพิ่มจำนวนของตัวเสารับแรงอัดเข้าไปในโครงสร้างชุดเดิม ด้วยเหตุนี้โครงสร้าง Tensegrity ระบบเดี่ยวจึงไม่จำเป็นที่จะต้องให้ความสนใจถึงวิธีการเชื่อมต่อกับยูนิตอื่นๆ เส้นทางของแรงดึงภายในโครงสร้างจึงไม่ซับซ้อน ทำให้โครงสร้างประเภทนี้ง่ายต่อการศึกษา

5.3.2 การเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนรับแรงอัดของ Tensegrity ระบบเดี่ยว

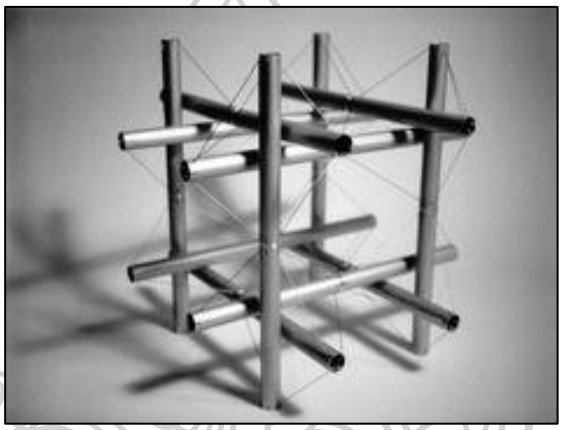
โครงสร้าง Tensegrity ระบบเดี่ยว มีหลักการในการเพิ่มชิ้นส่วนที่รับแรงอัดคือการแบ่งตัวอยู่ในโครงสร้างให้สมดุล จากตัวอย่างรูปภาพจะแสดงให้เห็นถึง Tensegrity รูปทรงพื้นฐานที่มีเสารับแรงอัด 3 เสาอยู่ภายในโครงสร้าง และเมื่อระบบทำการเพิ่มจำนวนเสารับแรงอัด รูปทรงของโครงสร้างเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากปลายเสารับแรงอัดภายในโครงสร้างที่กระทำต่อเชือกที่บีบรัดโครงสร้างไว้ ซึ่งเมื่อทำการพิจารณารูปแบบการวางตัวของเสารับแรงอัดที่เพิ่มจำนวนเข้ามา เปรียบเสมือนการคัดลอกรูปแบบการวางตัวจากเสารับแรงอัดที่มีอยู่เดิม เพียงขยับองศาเพิ่มเติมให้เสารับแรงอัดที่เพิ่มเข้ามาใหม่มีพื้นที่ให้สามารถค้ำโครงสร้างได้



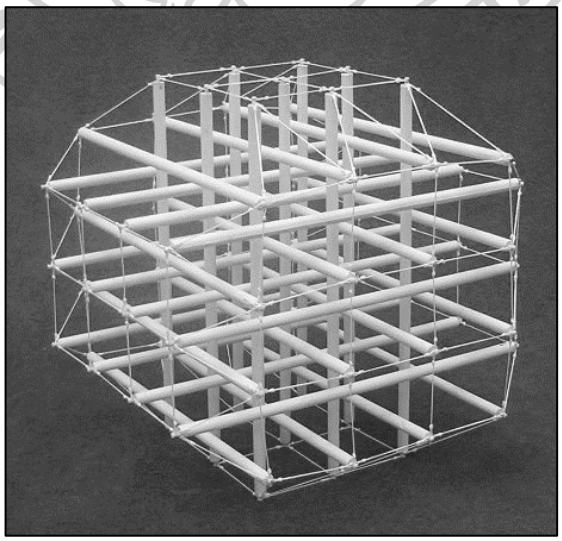
ภาพที่ 53 Tensegrity ระบบเดี่ยว

5.3.3 จุดเด่นจุดด่อยของ Tensegrity ระบบเดี่ยว

ด้วยคุณลักษณะของการเพิ่มชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่รับแรงอัดภายในโครงสร้าง โดยที่แนวเส้นรับแรงดึงยังมีจำนวนเท่าเดิม ผลคือการที่ทำให้โครงสร้างประเภทนี้มีความมั่นคงแข็งแรง และถือเป็นข้อดีของโครงสร้างระบบนี้ แต่ในบางครั้งการเพิ่มจำนวนเสารับแรงอัดในโครงสร้างบางรูปแบบ อาจทำให้พื้นที่โล่งภายในโครงสร้างลดลง อันเนื่องมาจากเสารับแรงอัดที่พาดไปมา จึงทำให้ไม่สามารถใช้พื้นที่ประกอบกิจกรรมได้อย่างเต็มที่ สิ่งนี้จึงถือว่าเป็นจุดที่ต้องพิจารณาในการเลือกรูปทรง Tensegrity ที่จะนำมาใช้งานในแง่สถาปัตยกรรม



ภาพที่ 54 Tensegrity ระบบเดี่ยว



ภาพที่ 55 Tensegrity ระบบเดี่ยว

บทที่ 6
แนวความคิดในการออกแบบ และการออกแบบ
สถาปัตยกรรมจาก Tensegrity

ในบทนี้จะอธิบายถึงแนวความคิดในการออกแบบรวมถึงขั้นตอนวิธีการทดลองการออกแบบโครงสร้าง Tensegrity ที่ได้จากการศึกษารูปแบบการทำงานของโครงสร้างแรงดึงต่อเนื่องชนิดต่างๆ โดยนำวิธีการเหล่านั้นมาผสมผสานพัฒนาต่อยอดเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้าง Tensegrity ระบบใหม่ที่สามารถตอบสนองความต้องการทางรูปแบบหรือรูปทรงในทางสถาปัตยกรรมได้

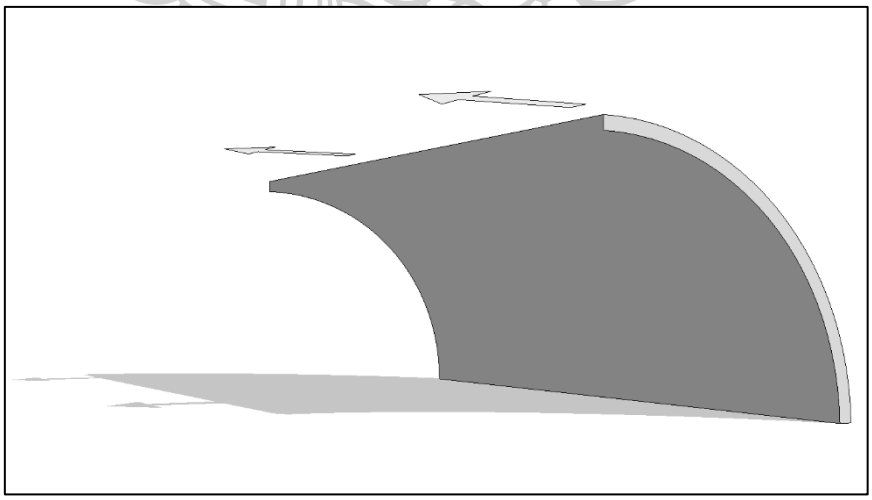
6.1 แนวคิดการออกแบบ

จากเนื้อหาการแบ่งประเภทของ Tensegrity ในบทที่ 5 จะสามารถจัดระบบ Tensegrity ออกเป็น 3 รูปแบบคือ
1.ระบบโดม 2.ระบบเส้นตรง และ3.ระบบเดี่ยว เมื่อทำการวิเคราะห์ในเชิงลักษณะในทางการปกคลุมพื้นที่เหมือนหลังคาหรือเปลือกอาคารของ Tensegrity ทั้ง 3 ระบบ จะพบว่า Tensegrity บางตัวมีความสามารถในการปกคลุมพื้นที่ได้ดี แต่ในแง่ของการปรับเปลี่ยนรูปทรงเพื่อให้รองรับกับกิจกรรมการใช้งานที่จะเกิดขึ้นภายในตัวโครงสร้างนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่ ขณะที่ Tensegrity บางตัวก็มีสามารถปรับเปลี่ยนหรือบังคับทิศทางได้ แต่ก็ไม่สามารถเป็นตัวที่ใช้แบ่งกันหรือปกคลุมพื้นที่ได้ดี หรือ Tensegrity บางตัวก็มีความสามารถที่จะเป็นตัวปกคลุมพื้นที่ได้ รวมถึงการปรับเปลี่ยนบังคับรูปทรง แต่ในแง่ของการขนส่งประกอบติดตั้งชิ้นส่วนของโครงสร้าง ก็กลายเป็นอุปสรรคในการเลือกใช้

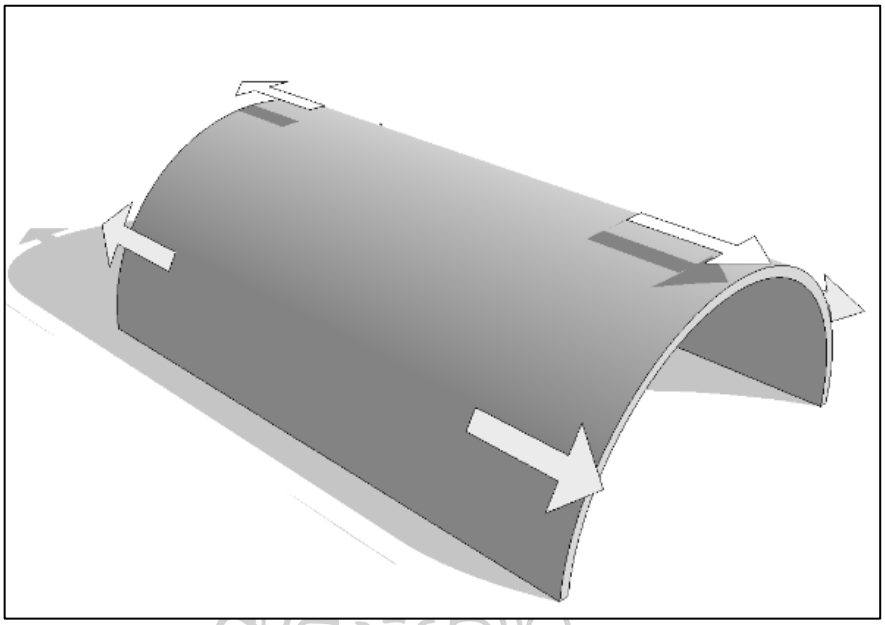
วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงต้องการนำเสนอ Tensegrity ที่มีความสามารถในการจัดการกับพื้นที่ที่ใช้งาน ทั้งเรื่องการเป็นสิ่งปกคลุมหรือการเป็นผิวตัวอาคาร รวมไปถึงความสามารถในการปรับเปลี่ยนรูปทรงไปตามพื้นที่ที่ต้องการใช้งาน และในแง่การขนส่งหรือการประกอบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ไม่เกิดอุปสรรคความยากหรือซับซ้อนจนเกินไป ทั้งหมดนี้คือการนำคุณลักษณะบางประการจาก Tensegrity แต่ละระบบเข้ามาผสมรวม เพื่อให้เกิดเป็นผลงานที่ว่า Tensegrity ระบบผสม

6.2 กระบวนการทดลอง

ในการทดลองการออกแบบโครงสร้าง Tensegrity ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะขอตั้งชื่อให้กับโครงสร้าง Tensegrity ชนิดนี้ว่า Tensegrity ระบบผสม อันเนื่องมาจากเป็นกระบวนที่การนำองค์ความรู้ทางด้าน Tensegrity ที่มีอยู่เดิม นำมาพัฒนาต่อยอด โดยการนำคุณลักษณะบางอย่างจาก Tensegrity หลายๆประเภทเข้ามารวมกัน เพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการทางรูปแบบหรือรูปทรงในงานทางสถาปัตยกรรม และในขั้นตอนการทดลองออกแบบ Tensegrity ระบบผสม จะใช้วิธีการสร้างหุ่นจำลองเพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมต่างๆที่จะเกิดขึ้นในโครงสร้าง โดยรูปแบบฟอร์มของโครงสร้างที่วางแผนไว้ข้างต้น คือการออกแบบโครงสร้าง Tensegrity ให้มีลักษณะเป็นศาลารูปทรงหลังคาโค้ง อันเนื่องมาจากด้วยคุณลักษณะของรูปทรงหลังคาโค้ง ถือเป็นรูปทรงที่ Tensegrity ทั้ง 3 ระบบที่เคยกล่าวถึงในบทที่ 5 ไม่สามารถจัดการโครงสร้างให้มีรูปทรงเป็นลักษณะนี้ได้ภายใต้โครงสร้างชิ้นเดียวกันทั้งหมด และรูปทรงหลังคาโค้งยังถือว่าเป็นรูปทรงที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดได้ในระดับหนึ่งคือ ขนาดความกว้าง-สูงของความโค้งที่โครงสร้างต้องทำการพาดช่วงกว้าง ต่อมาเป็นขนาดความยาวของโครงสร้างที่สารถเพิ่ม-ลดได้ตามที่ต้องการ และอีกนัยยะของการออกแบบโครงสร้าง Tensegrity ให้มีลักษณะรูปทรงเป็นแบบหลังคาโค้ง คือการหยิบยืมคุณสมบัติพิเศษบางประการจาก Tensegrity ระบบอื่นๆเข้ามาผนวกกัน

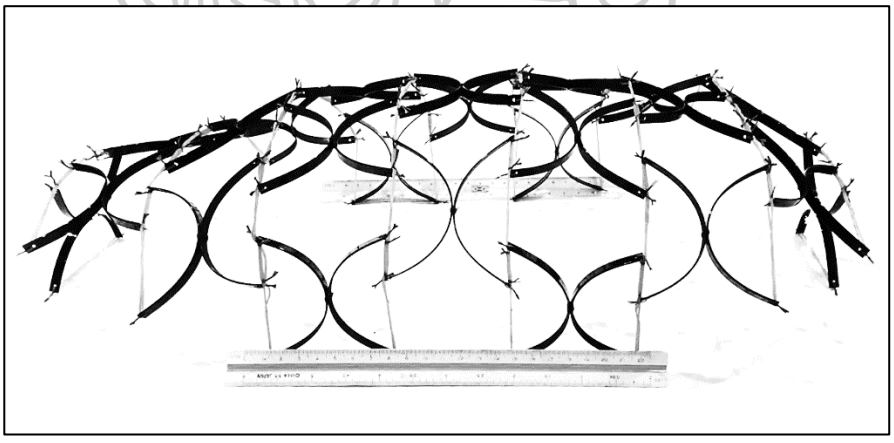


ภาพที่ 56 การเพิ่ม-ลดขนาดทางหน้าตัด



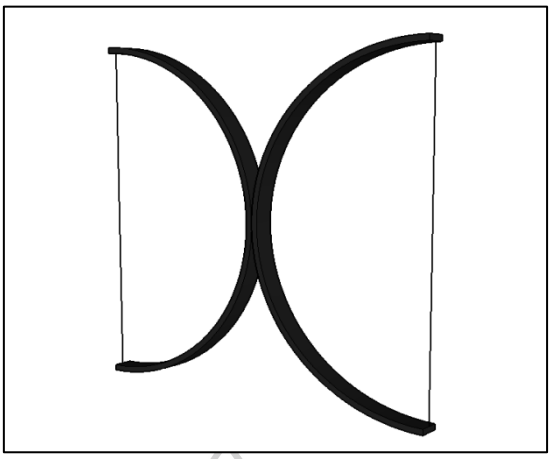
ภาพที่ 57 การเพิ่ม-ลดขนาดความยาว

6.2.1 การทดลองครั้งที่ 1



ภาพที่ 58 การทดลองครั้งที่ 1

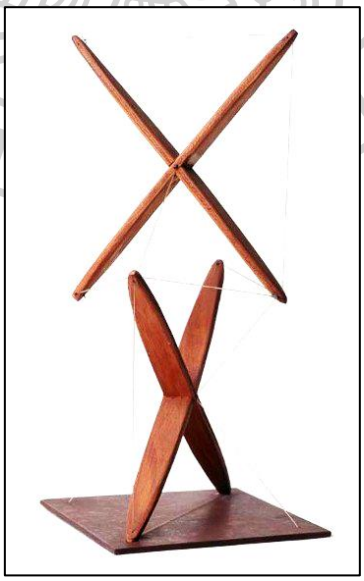
เริ่มจากยูนิตย่อยของหุ่นจำลองหมายเลย 1 ชิ้นส่วนสีดำทำหน้าที่รับแรงอัด และหนังยางทำหน้าที่รับแรงดัง ถึงขั้นตอนนี้อาจจะสงสัยว่า เหตุชิ้นส่วนสีดำถึงอยู่ติดกันได้โดยไม่ผิดนิยามของ Tensegrity ที่ชิ้นส่วนรับแรงอัดห้ามสัมผัสกัน



ภาพที่ 59 การทดลองครั้งที่ 1

โดยกรณีนี้จะขอเปรียบเปรยว่า ชิ้นส่วนสีดำดัดโค้งชิ้นนี้ คือวัตถุที่นับเป็น 1 ชิ้น มีองค์ประกอบเป็นชิ้นเดียวกัน ซึ่งในจุดนี้จะขออ้างอิงจากรูปแบบโครงสร้าง X- Module Tensegrity ที่ถูกออกแบบโดยสเนลสันในปี 1948 หรือ X-tree Tensegrity โดย Konstantin ซึ่งรูปแบบยูนิตย่อย

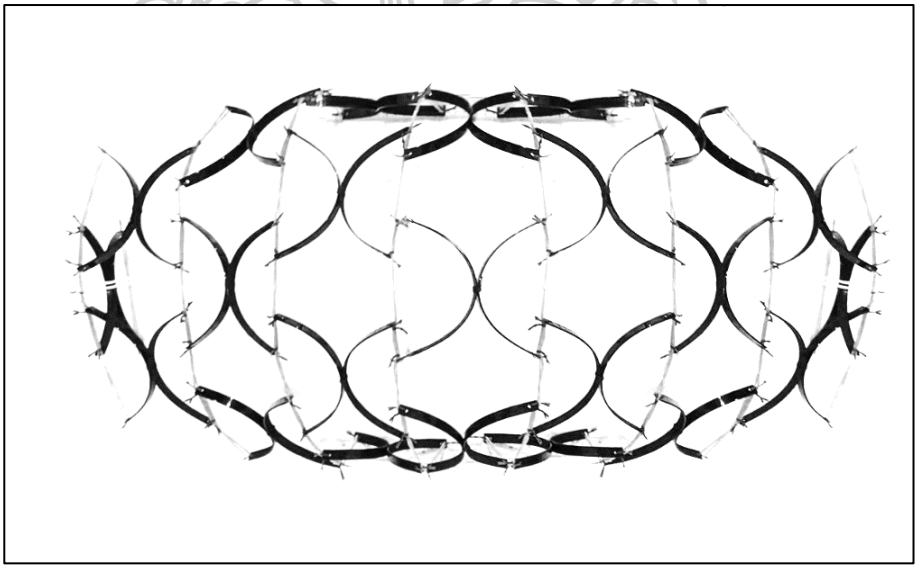
จากทั้งสองตัวอย่างที่อ้างอิงนี้ มีหลักการทำงานที่คล้ายกันคือ การมีฉุปทรงคล้ายกับตัว X และปลายขาทั้ง 4 ทำหน้าที่ถูกบีบรัดด้วยแรงดึง



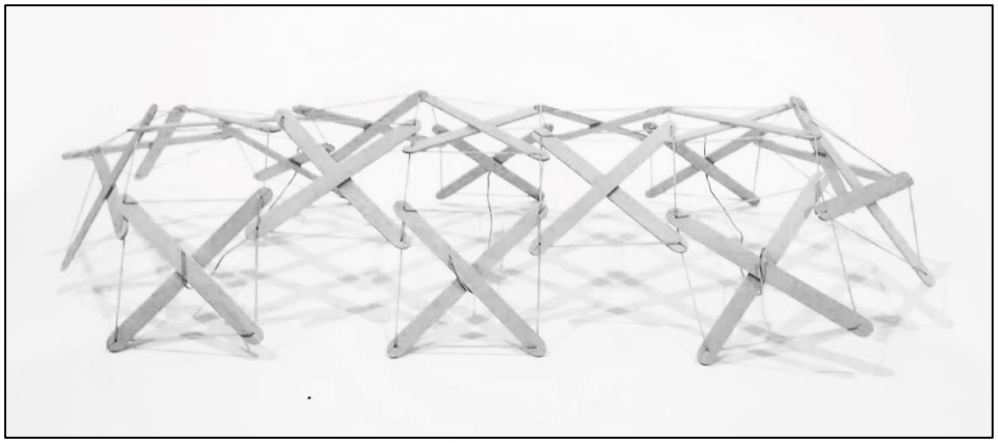
ภาพที่ 60 X- Module Tensegrity

ภาพที่ 61 X-tree Tensegrity

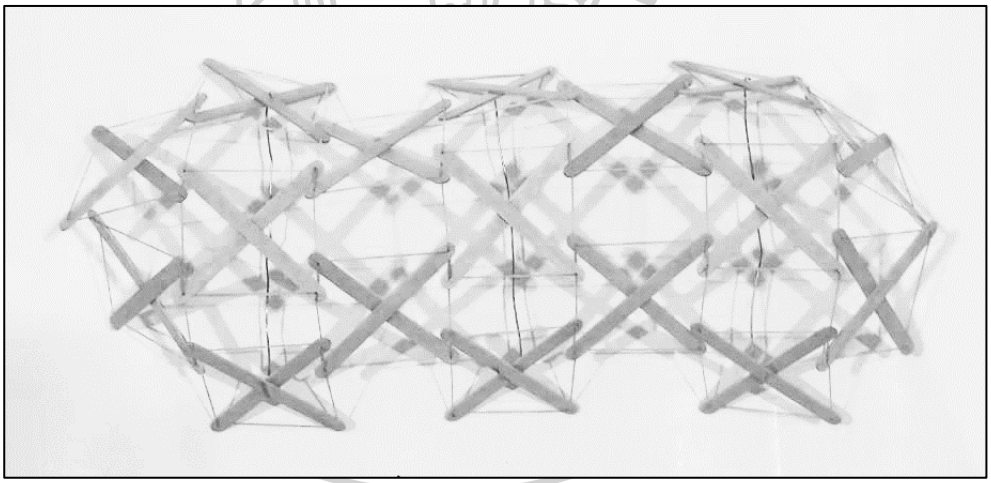
ขั้นตอนต่อมาคือการเชื่อมต่อระหว่างยูนิตย่อยเข้าด้วยกัน ซึ่งรูปทรงโดยรวมของโครงสร้างจะต้องเป็นไปในลักษณะศาลาหลังคาโค้ง



ภาพที่ 62 การทดลองครั้งที่ 1



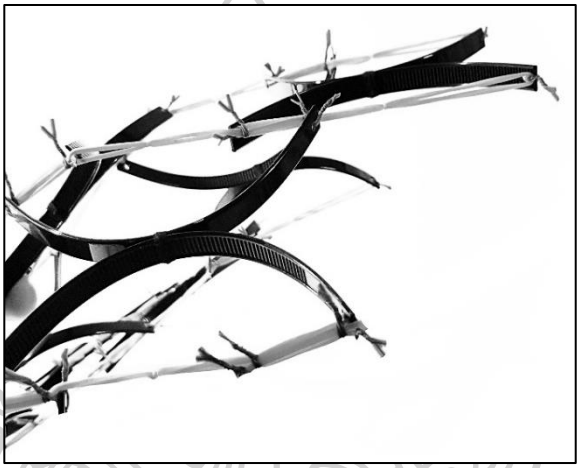
ภาพที่ 63 การทดลองครั้งที่ 1



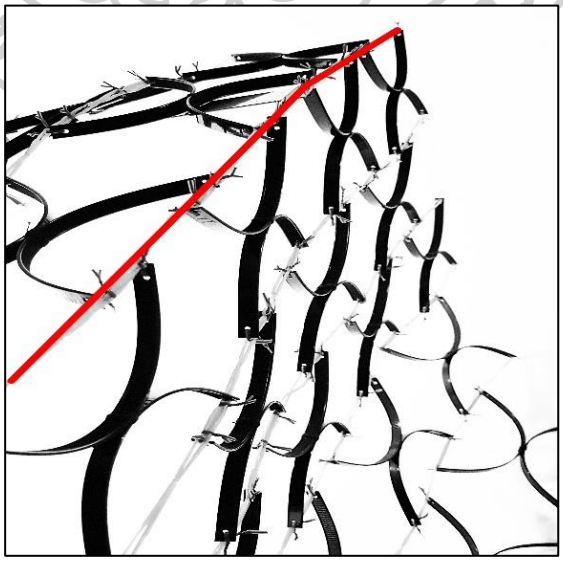
ภาพที่ 64 การทดลองครั้งที่ 1

สรุปผลการทดลองครั้งที่ 1

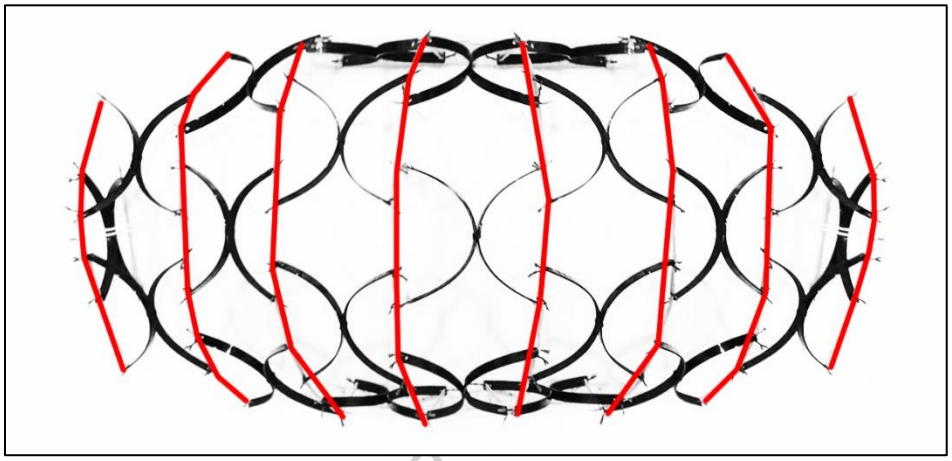
จากการทดลองครั้งที่ 1 พบว่า หุ่นจำลองตัวนี้มีความสามารถในการจัดการรูปทรงให้เป็นตามรูปแบบที่กำหนดไว้ได้ในระดับหนึ่ง แต่ความเสถียรมั่นคงของโครงสร้างโดยรวมยังทำได้ไม่ดีพอ อันเนื่องมาจากโครงสร้างมีความสามารถรับแรงได้เพียงทิศทางเดียวคือแนวการพาดช่วงกว้าง แต่ในอีกทิศทางที่เป็นแนวการเพิ่มระยะความยาวของโครงสร้าง จุดๆคือสิ่งที่ทำให้โครงสร้างตัวนี้ขาดความสมบรูณ์อันเนื่องมาจากการไม่มีแรงมาคอยค้ำระหว่างการเชื่อมยูนิตในแนวตัดขวาง



ภาพที่ 65 ความสามารถรับแรงตามแนวยาว

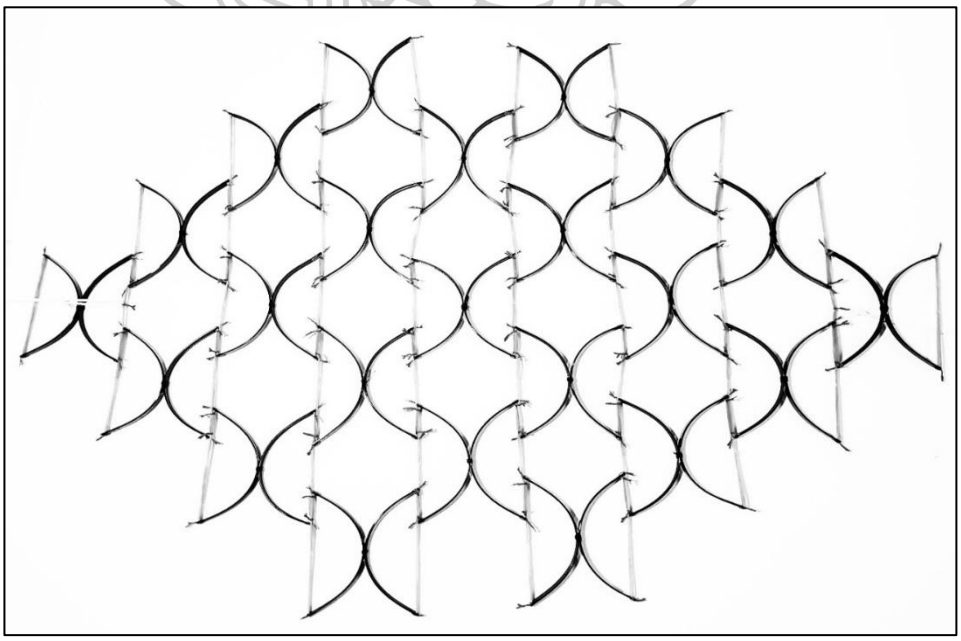


ภาพที่ 66 ไม่สามารถรับแรงตามแนวตัดขวาง



ภาพที่ 67 ภาพแสดงแนวแรงทางตัดขวางของโครงสร้าง

ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรูปแบบการเชื่อมต่อของยูนิตย่อยที่ใช้วิธีการแบบเดียวกันกับ Tensegrity ระบบโดม ซึ่งเป็นระบบที่ต้องต่อยูนิตย่อยให้ครบระบบ (ต่อยูนิตครบเต็มฟอร์ม) และต้องมีรูปทรงเป็นทรงกลมหรือทรงโดมเท่านั้น อันเนื่องมาจากรูปแบบการเชื่อมต่อยูนิตที่เป็นเหมือน 2 มิติ จึงทำให้หุ่นจำลองในการทดลองครั้งที่ 1 ไม่สมบรูณ์เพราะขาดมิติของการเชื่อมต่อยูนิตย่อยไปบางส่วน

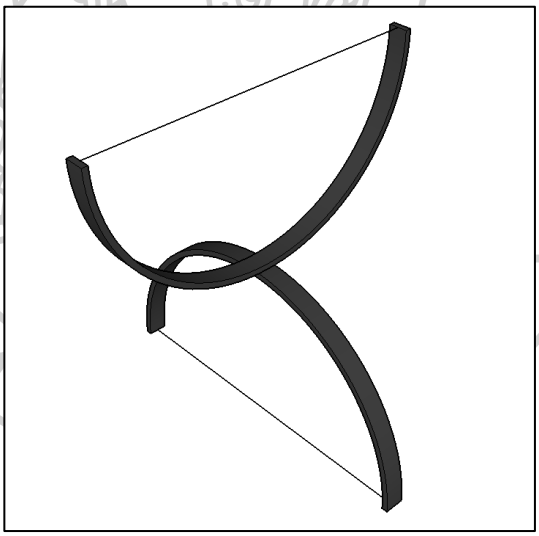


ภาพที่ 68 การทดลองครั้งที่ 1

6.2.2 การทดลองครั้งที่ 2

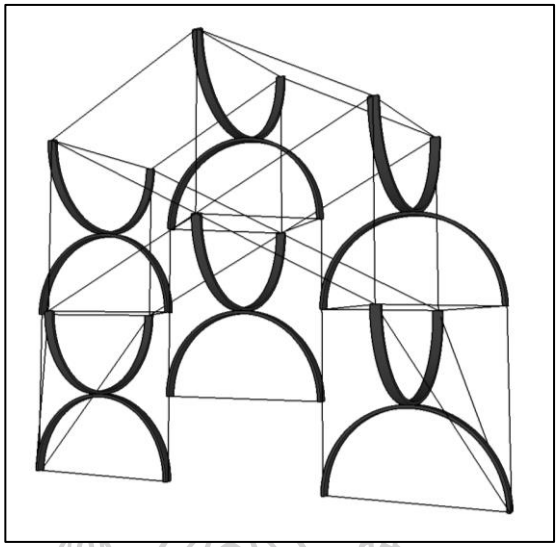
จากผลการทดลองครั้งที่ 1 ทำให้ทราบถึงขั้นตอนในการออกแบบ Tensegrity ที่มีรูปทรงในลักษณะเป็นรูปทรงเปิด หรือการที่ยูนิตทั้งระบบไม่ได้เข้ามาเชื่อมต่อบรรจบกันเหมือน Tensegrity ระบบโดม จะต้องทำการออกแบบรูปแบบมิติของแรงยึดหรือแรงดึงระหว่างยูนิตในโครงสร้างให้มี 2 ทิศทางขึ้นไป เพื่อความเสถียรสมดุลในตัวโครงสร้างให้และทำให้โครงสร้างตั้งตัวคงรูปอยู่ได้

ในการทดลองครั้งที่ 2 จึงทำการออกแบบด้วยการเพิ่มเติมมิติของแรงดึงระหว่างยูนิตเข้าไป โดยยังคงใช้ชิ้นส่วนที่เป็นตัวรับแรงอัดในลักษณะที่มีปลายขา 4 จุด และมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบลักษณะของชิ้นส่วนตัวรับแรงอัดในเรื่องทิศทางการปิดมุมจุดปลายขาให้ตั้งฉากกัน

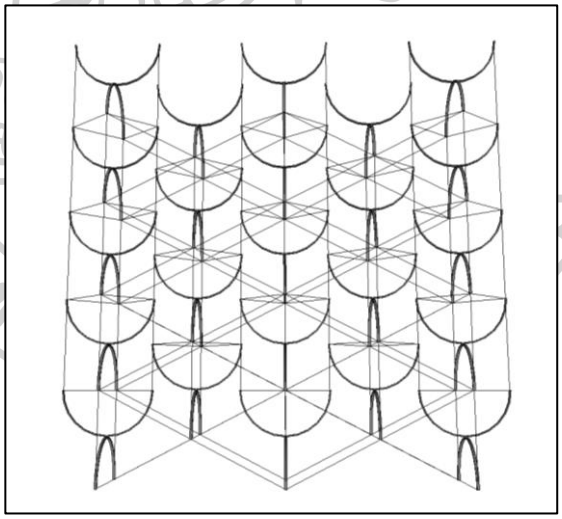


ภาพที่ 69 การทดลองครั้งที่ 2

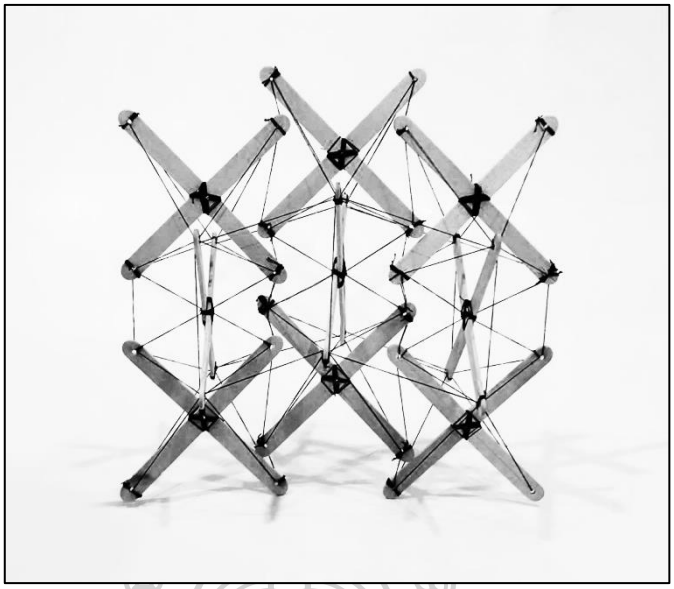
การเลือกใช้วิธีการที่กำหนดให้ชิ้นส่วนตัวรับแรงอัดทำมุมที่ปลายขาให้ตั้งฉากกันเพื่อเป็นการเพิ่มมิติทิศทางของแรงดึงระหว่างยูนิต ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและมีความสเถียรมากขึ้น



ภาพที่ 70 การทดลองครั้งที่ 2



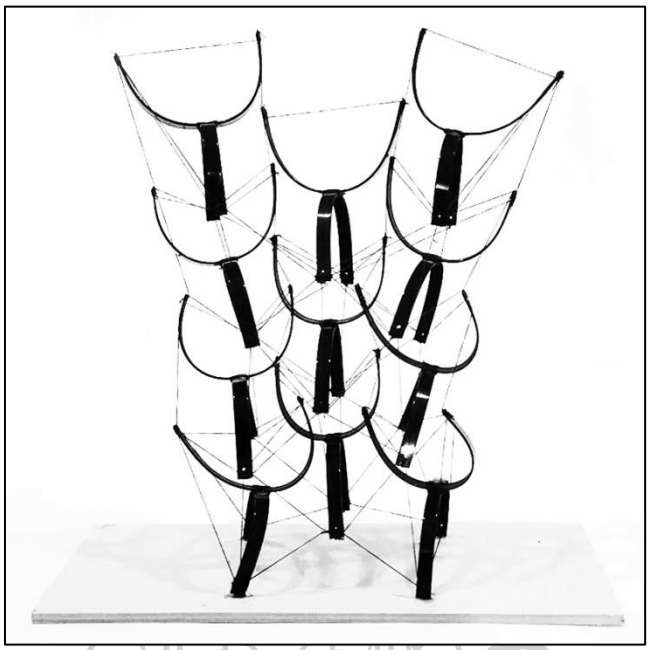
ภาพที่ 71 การทดลองครั้งที่ 2



ภาพที่ 72 การทดลองครั้งที่ 2

สรุปผลการทดลองครั้งที่ 2

จากการทดลองครั้งที่ 2 พบว่า หุ่นจำลองตัวนี้มีความสามารถในการจัดการรูปทรงให้เป็นตามรูปแบบที่กำหนดไว้ได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังระดับที่ไม่น่าพอใจ โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงและความสเถียร ซึ่งโครงสร้างตัวนี้ถือว่ามีจุดเด่นในเรื่องของความแข็งแรงอันเนื่องมาจากการเพิ่มมิติการเชื่อมต่อทิศทางของแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดลองหุ่นจำลองตัวนี้ได้มีการดึงเอาลักษณะบางส่วนของการเชื่อมต่อแรงดึงมากจาก Tensegrity ระบบเส้น ซึ่งโดยปกติของ Tensegrity ระบบเส้น จะทำการเชื่อมต่อระหว่างยูนิตกับยูนิตออกไปในทางแกนเดียวคือการเพิ่มระยะความยาว แต่ใน Tensegrity ระบบผสมนั้นจะต้องมีการเชื่อมต่อกันระหว่างยูนิตทั้งสองแนวแกนคือทั้งแนวกว้างและแนวยาวด้วยจุดๆนี้จึงทำให้หุ่นจำลองในการทดลองครั้งที่ 2 มีจำนวนจุดเชื่อมต่อระหว่างยูนิตหลายจำนวน ซึ่งทำให้เกิดความยากลำบากในขั้นตอนการประกอบติดตั้งโครงสร้าง โดยเฉพาะการควบคุมให้แรงดึงในแต่ละยูนิตย่อยมีค่าที่กระจายไปเท่าๆกัน



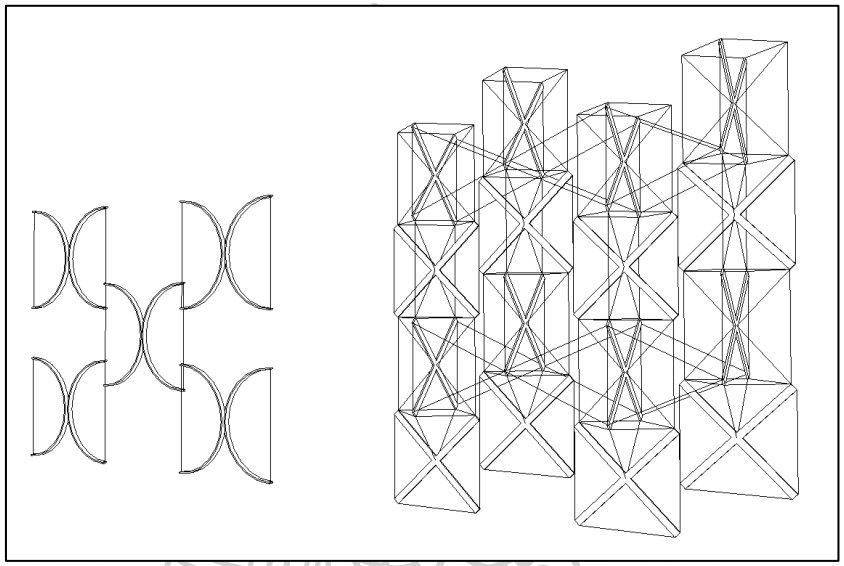
ภาพที่ 73 การทดลองครั้งที่ 2

ด้วยความซับซ้อนของการกระกอบโครงสร้างจึงทำให้การควบคุมแรงดึงในแต่ละยูนิตเป็นไปได้ยาก ผลจึงทำให้โครงสร้างโดยรวมมีรูปร่างหรือรูปทรงที่ผิดเพี้ยนออกไปจากแบบที่กำหนดไว้ แม้ความจริงแล้วเราสามารถทำโครงสร้างตัวนี้ออกมาให้มีความเที่ยงตรงตามแบบที่กำหนดไว้ แต่จุดประสงค์อีกข้อหนึ่งของการออกแบบโครงสร้าง Tensegrity ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้คือการพัฒนาให้ให้โครงสร้างประเภทนี้ มีความซับซ้อนในการประกอบติดตั้งที่น้อยลง เพราะด้วยอุปสรรคเหล่านี้ ถือว่าเป็นปัญหาที่ทำให้โครงสร้าง Tensegrity ไม่ได้รับความนิยมรวมถึงการขาดการพัฒนาที่ต่อเนื่อง

ดังนั้น ในการทดลองหุ่นจำลองครั้งที่ 2 ถือว่าโครงสร้างตัวนี้ยังไม่บรรลุเป้าหมายของโครงการ และข้อสังเกตุจากการทดลองครั้งที่ 2 คือ การใช้ชิ้นส่วนแรงดึงที่เป็นลักษณะแบบเส้นหรือสายเคเบิล เมื่อเราเพิ่มมิติทิศทางของการเชื่อมต่อระหว่างยูนิต แน่นอนว่าสิ่งที่เพิ่มขึ้นนั่นคือจำนวนเส้นแรงดึง และการที่จะควบคุมให้ความตึงเชื่อกในเส้นแรงดึงแต่ละเส้นให้มีความเท่ากันนั่นเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยากแล้ว เมื่อยูนิตหลายๆยูนิตมารวมกัน ผลลัพธ์จึงทำให้รูปทรงของโครงสร้างมีความบิดเบี้ยว และยังรวมไปถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างปลายเชื่อกกับปลายขาตัวรับแรงก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้โครงสร้างตัวนี้มีความยากและซับซ้อนในการที่จะประกอบติดตั้งให้มีความสมบรูณ์

6.2.3 การทดลองครั้งที่ 3

จากผลการทดลองครั้งที่ 1 ที่ทำให้ทราบถึงขั้นตอนในการออกแบบ Tensegrity ที่มีรูปทรงในลักษณะเป็นรูปทรงเปิด หรือการที่ยูนิตทั้งระบบไม่ได้เข้ามาเชื่อมต่อบรรจบกันเหมือน Tensegrity ระบบโดม จะต้องทำการออกแบบรูปแบบมิติของแรงยึดหรือแรงดึงระหว่างยูนิตในโครงสร้างให้มี 2 ทิศทางขึ้นไป เพื่อความเสถียรสมดุลในตัวโครงสร้างให้และทำให้โครงสร้างตั้งตัวคงรูปอยู่ได้

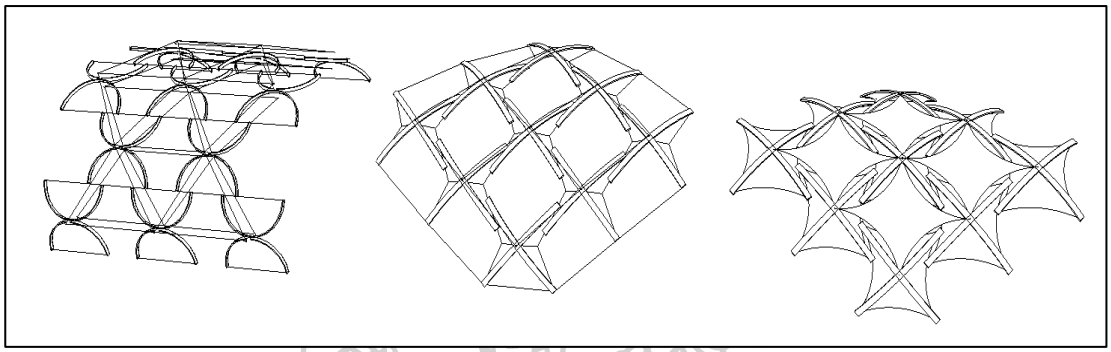


ภาพที่ 74 แบบการทดลองครั้งที่ 1-2

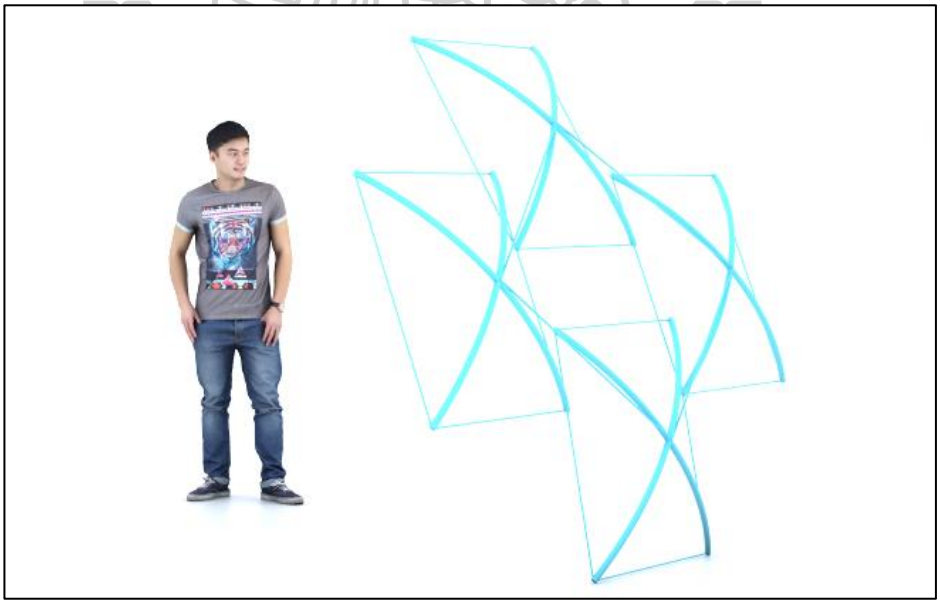
ในการทดลองครั้งที่ 2 จึงทำการออกแบบด้วยการเพิ่มเติมทิศทางการเชื่อมต่อของแรงดึงระหว่างยูนิตเข้าไป แต่ด้วยทิศทางของการเชื่อมต่อระหว่างตัวยูนิตที่มีหลายจุด บวกกับชิ้นส่วนที่รับแรงดึงมีลักษณะเป็นเส้น จึงทำให้เกิดความยากลำบากในการประกอบติดตั้งโครงสร้าง

ในการทดลองครั้งที่ 3 เพื่อให้เป็นการลดอุปสรรคยุ่งยากในการประกอบชิ้นส่วนของโครงสร้าง จึงใช้วิธีการนำชิ้นส่วนที่รับแรงดึงจากลักษณะที่เป็นเส้นเพียงอย่างเดียว มาผนวกกับชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวแบบที่มีความยืดหยุ่น เพื่อช่วยลดปัญหาในการควบคุมแรงดึงในเส้นเชือก อีกทั้งยังเป็นการช่วยในเรื่องการปิดบังพื้นที่ภายในของตัวสถาปัตยกรรม ทั้งเรื่องแสงแดด ลม หรือแม้กระทั้งความเป็นสวนตัว

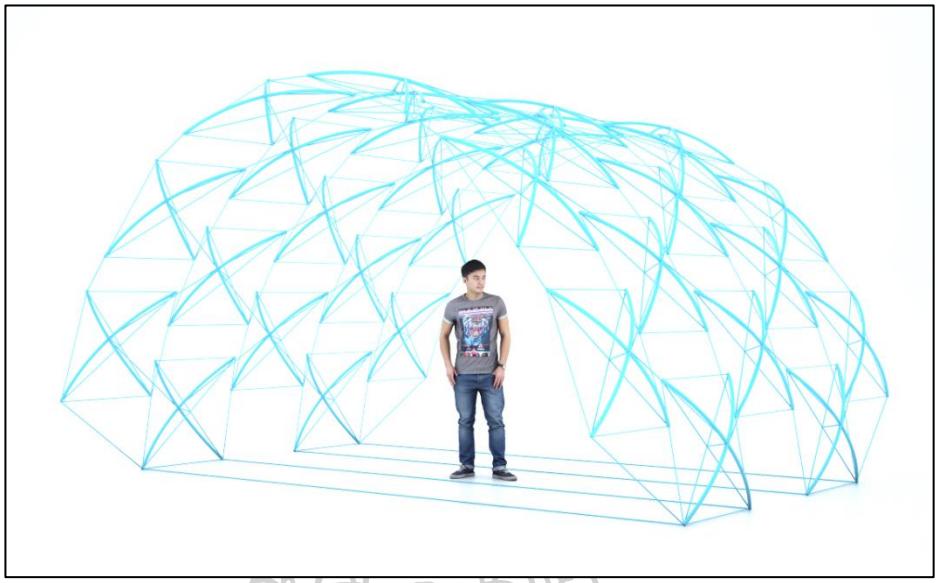
ในการทดลองครั้งที่ 3 จะใช้วิธีการวางชิ้นส่วนตัวที่รับแรงอัดในลักษณะคล้ายกับขั้นตอนการทดลองครั้งที่ 1 คือการวางแบบเป็นระนาบแบน 2 มิติ อันเนื่องมาจากการวางตัวของชิ้นส่วนรับแรงอัดในลักษณะนี้ จะมีความซับซ้อนในการประกอบชิ้นส่วนน้อยกว่าการวางชิ้นส่วนรับแรงอัดแบบการทดลองครั้งที่ 2 หรือเรียกว่าการต่อตัวแบบดีดตัวเองขึ้นไปเรื่อยๆ



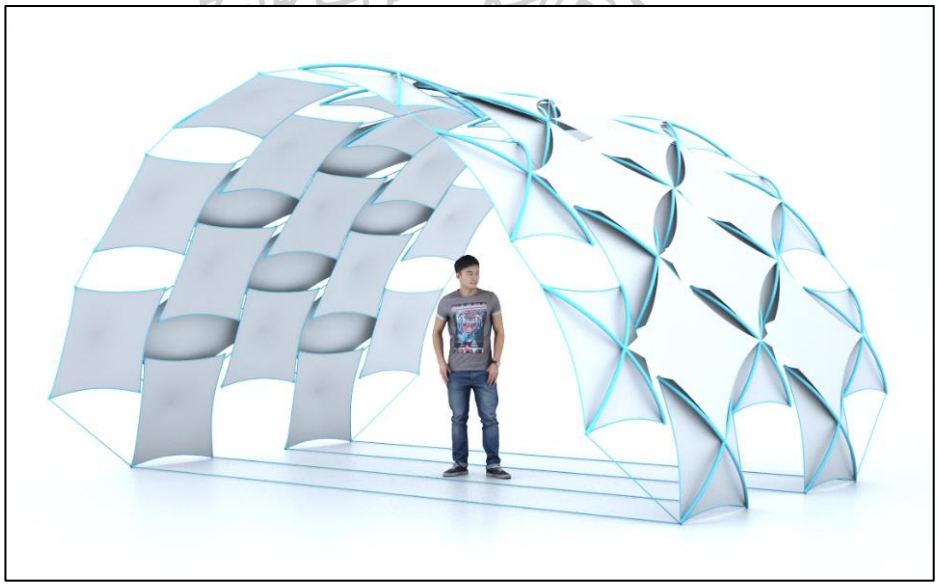
ภาพที่ 75 แบบแสดงการพัฒนาโครงสร้าง Tensegrity



ภาพที่ 76 โครงสร้างการทดลองครั้งที่ 3

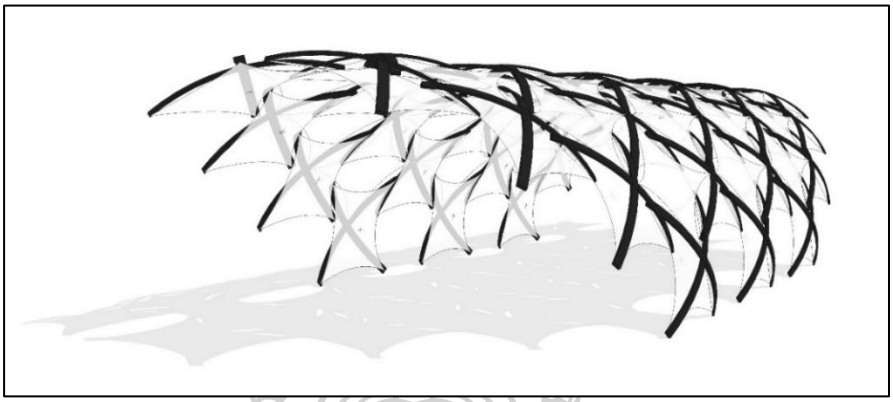


ภาพที่ 77 โครงสร้างการทดลองครั้งที่ 3

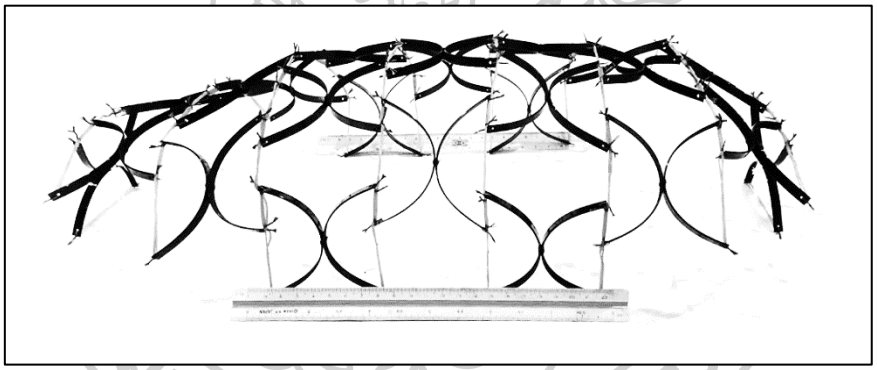


ภาพที่ 78 แบบจำลองการทดลองครั้งที่ 3

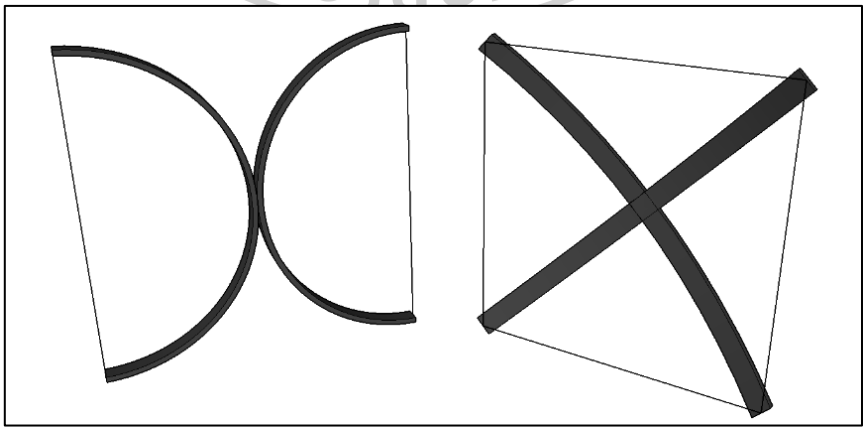
ในการทดลองครั้งที่ 3 ชิ้นส่วนตัวที่ทำหน้าที่รับแรงอัด จะกำหนดให้ลักษณะทิศทางของการถูกรับแรงเป็นไปในแนวความลึกของระนาบ ซึ่งจะแตกต่างกับการทดลองในครั้งที่ 1 ที่กำหนดให้ชิ้นส่วนที่รับแรงอัดมีการรับแรงในระนาบด้านข้างของชิ้นส่วน



ภาพที่ 79 แบบจำลองการทดลองครั้งที่ 3



ภาพที่ 80 การทดลองครั้งที่ 1



ภาพที่ 81 การทดลองครั้งที่ 3

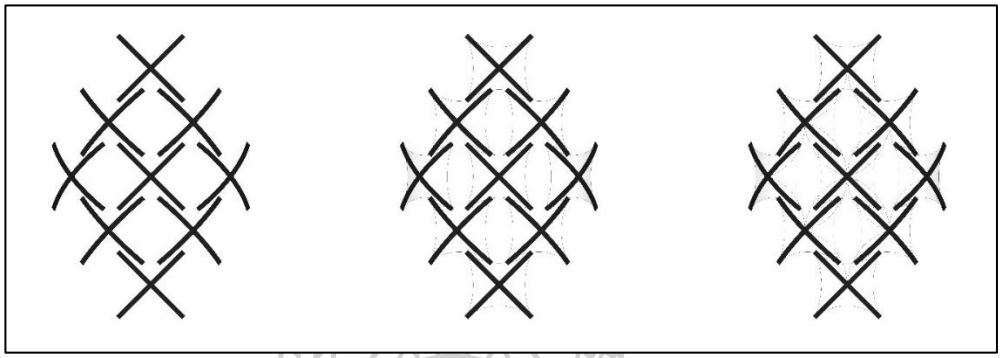
ในขั้นตอนนี้ คือการทดลองสร้างหุ่นจำลองตามแบบ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต้องนำชิ้นส่วนรับแรงดึงที่เป็นลักษณะแผ่นผืนมาประกอบเข้ากับชิ้นส่วนรับแรงอัด พบว่ามีขั้นตอนในการประกอบที่ง่ายและประหยัดเวลาขึ้น แต่โครงสร้างโดยรวม ณ ตอนนี้ยังไม่เสร็จสมบรูณ์ จึงยังไม่สามารถทรงตัวได้

อันเนื่องมาจากการมีทิศทางของแรงดึงภายในโครงสร้างเพียงแค่ทิศเดียว ซึ่งเป็นผลลัพธ์เป็นไปตามที่คาดการไว้แบบเดียวกันกับการทดลองครั้งที่ 1

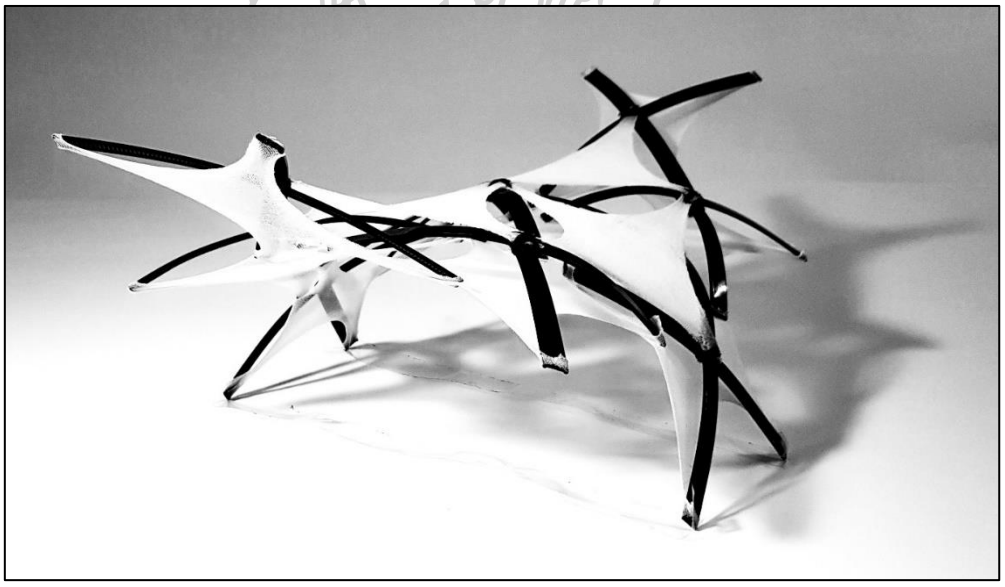
ภาพที่ 82 ภาพแสดงการพาดช่วงกว้างทางแนวยาวของโครงสร้าง

ภาพที่ 83 ภาพแสดงการพับงอทางแนวตัดขวางของโครงสร้าง

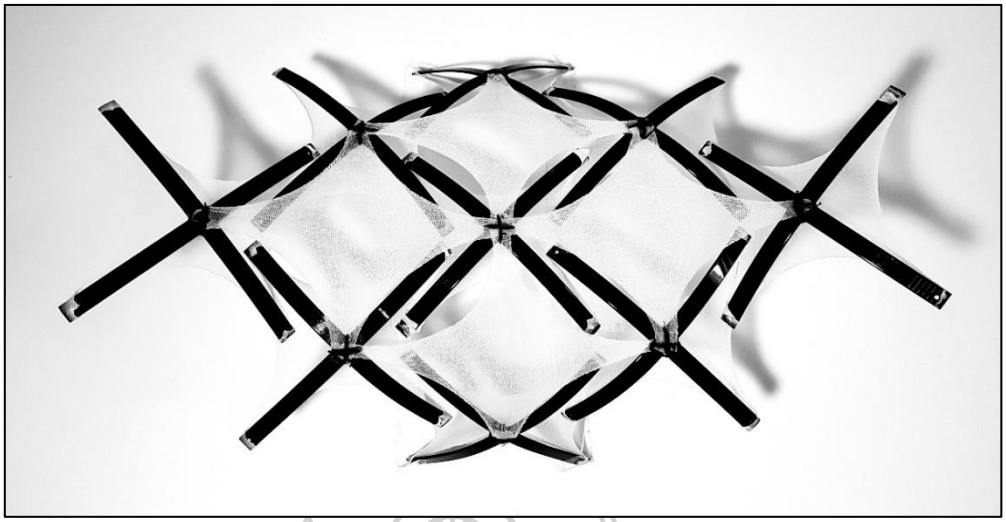
จึงทำให้ต้องมีการเพิ่มมิติของแรงดึงเข้าไปอีก 1 ชั้น ตามแนวตัดขวาง เพื่อให้โครงสร้างสามารถทรงตัวคงรูปอยู่ได้ทั้งสองด้าน



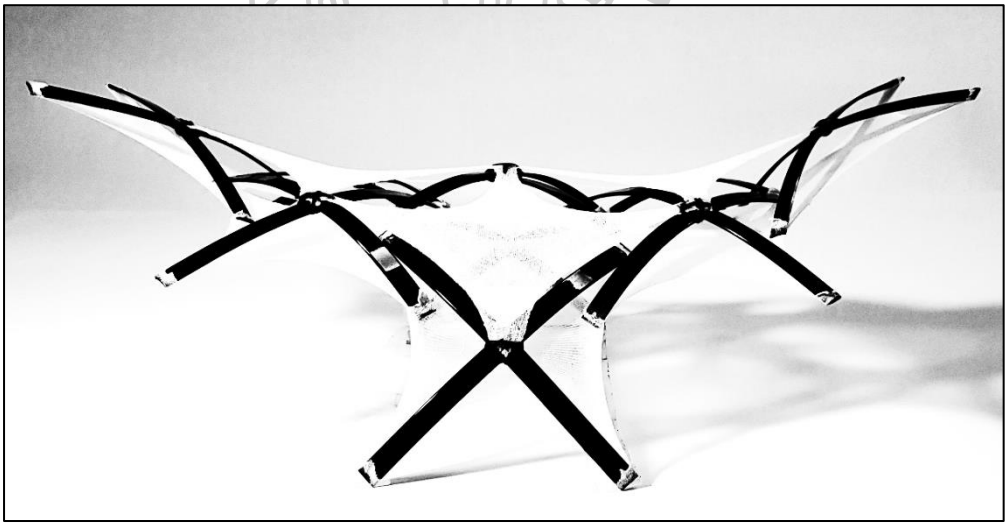
ภาพที่ 84 ภาพแสดงการเพิ่มแนวแรงดึง



ภาพที่ 85 การทดลองครั้งที่ 3

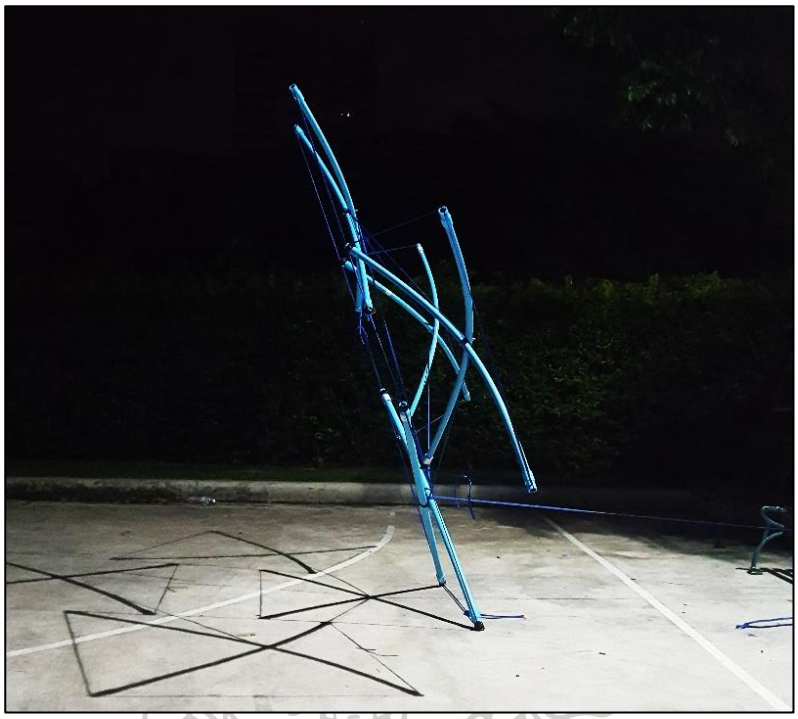


ภาพที่ 86 การทดลองครั้งที่ 3



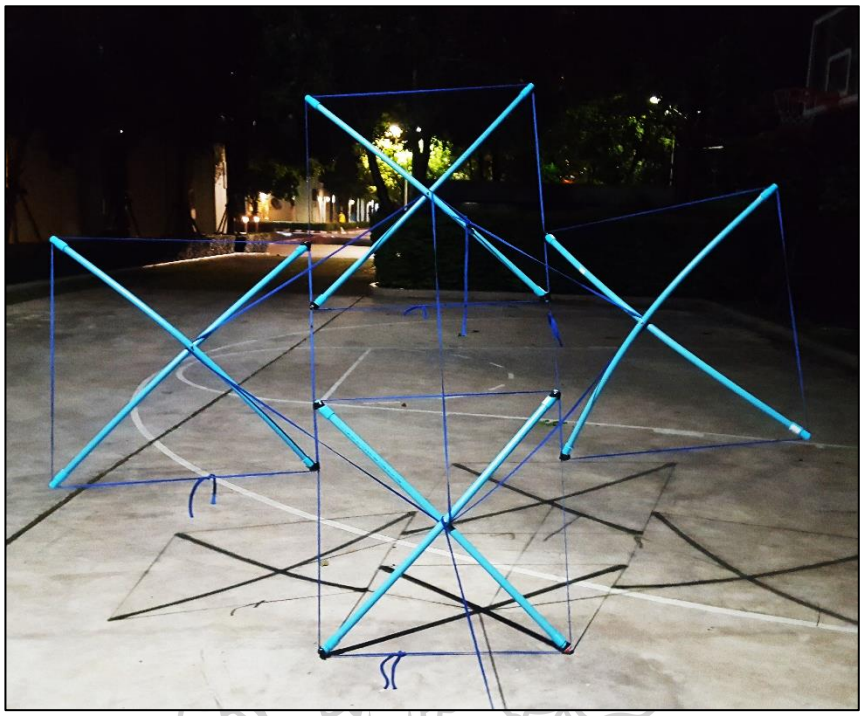
ภาพที่ 87 การทดลองครั้งที่ 3

ผลจากการทดลองหุ่นจำลองขนาดเล็กพบว่า โครงสร้างสามารถทรงตัวได้และมีความเสถียรสมดุล อีกทั้งในการประกอบชิ้นส่วนก็มีขั้นตอนที่ง่ายและประหยัดเวลามากกว่าเดิม และขั้นตอนต่อมาคือการทดลองกับหุ่นจำลองในขนาดจริง มาตราส่วน 1:1 แต่เป็นการใช้ชิ้นส่วนที่รับแรงอัดในลักษณะเส้น อันเนื่องมาจากการปัญหาในการจัดหาวัสดุ



ภาพที่ 88 การทดลองครั้งที่ 3

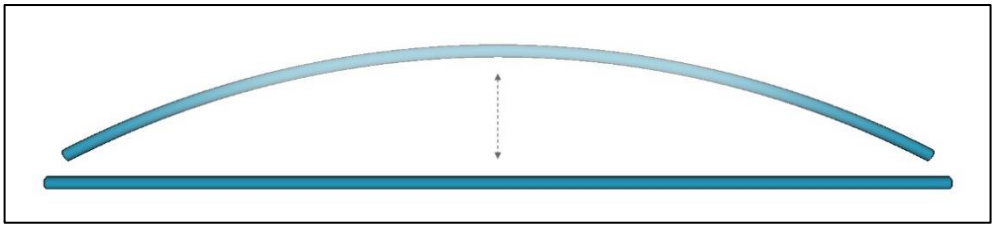
ชิ้นส่วนรับแรงอัดของหุ่นจำลองมาตราส่วน 1:1 ทำมาจากท่อ PVC ขนาด ¾” ความหนา
13.5 มม. เหตุผลในการเลือกใช้วัสดุประเภทนี้ อันเนื่องมาจากในขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนโครงสร้าง ยังต้องอาศัยแรงงานคนเป็นส่วนหลัก และแรงคนสามารถจัดการกับวัสดุท่อ PVC ในการรับแรงอัดได้ในระดับหนึ่ง เมื่อใช้คนในการทำงาน สิ่งต่อมาที่สำคัญคือเรื่องความปลอดภัย ซึ่งเนื้อวัสดุมีความเหนี่ยวยากต่อการแตกหักอันจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ติดตั้งโครงสร้าง และวัสดุตัวนี้ยังมีน้ำหนักเบาประกอบกับเรื่องของงบประมาณและการจัดหาวัสดุที่สามารถหาได้ตามท้องตลาดทั่วไป โดยวัสดุอีกประเภทที่ทำหน้าที่รับแรงดึงคือเชือกที่มีลักษณะเส้นใยทอแบบผ้า อันเนื่องมาจากเชือกประเภทนี้มีความอ่อนตัวสูงและผิวหยาบ เมื่อทำการมัดปมในกรณีที่ต้องทำการต่อความยาวเชือก ปมจะหลุดยากกว่าเชือกชนิดอื่นๆ ประกอบกับเชือกชนิดนี้มีน้ำนักเบาและราคาถูก สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป



ภาพที่ 89 การทดลองครั้งที่ 3

จากการทดลองพบว่าหุ่นจำลองโครงสร้างตัวนี้สามารถรักษารูปทรงอยู่ได้ มีความแข็งแรงอยู่ในจุดที่สามารถทนต่อแรงสั่นสะเทือนจากภายนอกได้ โดยความแข็งแรงในโครงสร้างตัวนี้สามารถสังเกตุจากภายนอกได้ด้วยการพิจารณาจุดที่เชื่อมต่อกันระหว่างยูนิตย่อย ซึ่งจะปรากฏความโค้งที่เกิดจากการอ่อนตัวของวัสดุ โดยเริ่มจากแรงดึงของเส้นเชือกในยูนิต เมื่อเส้นเชือกมีแรงดึงที่ต่ำเกินไปก็จะไม่สามารถดันตัวยูนิตที่เข้ามาเชื่อมต่อจากด้านบนให้ลอยขึ้นไปได้ และแรงดึงในเส้นเชือกตัวนี้ก็เกิดจากความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุท่อ PVC ที่จะทำได้ กล่าวคือ แรงดึงในเส้นเชือกจะแปรผันตรงกับแรงอัดของท่อ ทั้งนี้ไม่ควรใส่แรงอัดในท่อ PVC มากจนเกินไป เพราะจะทำให้ตัววัสดุศูนย์เสียการรับแรง ยกตัวอย่างท่อ PVC ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด ¾” ความหนา 13.5 มม. เมื่อท่อโดนแรงอัดก็จะโค้งตัวขึ้นเรื่อยๆ โดยท่อ PVC ตัวนี้สามารถโค้งตัวออกไปจากแนวเดิมได้ที่ระยะประมาณ 20 ซม.

หากโค้งตัวมากกว่านี้จะทำให้ตัววัสดุไม่สามารถคืนรูปกลับเป็นรูปทรงเดิมได้ ถึงจุดนี้ท่อจะไม่สามารถรับแรงอัดได้ดีเท่าเดิม หรือเรียกกรณีนี้ว่าการเลยขีดจำกัดสภาพยืดหยุ่น (elastic limit)



ภาพที่ 90 การทดลองครั้งที่ 3

ภาพที่ 91 การทดลองครั้งที่ 3

สรุปผลการทดลองครั้งที่ 3

จากการทดลองครั้งที่ 3 พบว่า หุ่นจำลองตัวนี้มีความสามารถในการจัดการรูปทรงให้เป็นตามรูปแบบที่กำหนดไว้ได้ โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงและความสเถียร ขั้นตอนของการประกอบชิ้นส่วนโครงสร้างไม่ซับซ้อนจนเกินไป จึงทำให้การควบคุมรูปทรงให้เป็นได้ง่ายขึ้น และด้วยคุณสมบัติการต่อยูนิตเพิ่มจำนวนไปได้เรื่อยๆ โดยไม่มีการครบระบบแบบ Tensegrity ระบบเส้น บวกกับความสามารถในการปกคลุมพื้นที่แบบ Tensegrity ระบบโดม โดยที่ยังสามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงโครงสร้างบางส่วนได้ ทำให้โครงสร้าง Tensegrity ตัวนี้ เป็น Tensegrity ระบบผสมที่เกิดจากการนำคุณสมบัติจาก Tensegrity ประเภทต่างๆเข้ามารวมกันไว้ให้มีความสมบรูณ์

บทที่ 7
บทสรุป

สรุปผลการศึกษา

การศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหมายของลักษณะทางโครงสร้างและกรอบความคิดพื้นฐานของสิ่งที่เรียกว่า Tensegrity รวมถึงการอธิบายองค์ประกอบและแสดงให้เห็นถึงข้อดีข้อด้อยของ Tensegrity รวมไปถึงการแบ่งประเภทของระบบ Tensegrity และนำข้อมูลเหล่านี้มารังสรรค์ผลงานทางสถาปัตยกรรมให้ออกมาเป็นโครงสร้าง Tensegrity ระบบผสม ที่เกิดจากการหยิบยืมคุณลักษณะบางประการจาก Tensegrity แต่ละประเภท มาทำการออกแบบให้มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนรูปทรงโครงสร้างได้ เพื่อให้รองรับกับการใช้งานได้ในทุกๆพื้นที่ที่ติดตั้งโครงสร้างหรือรองรับรูปแบบลักษณะกิจกรรมภายในโครงสร้างที่จะเกิดขึ้น

ซึ่งประเดนจากกระบวนการศึกษาทดลองจนออกมาเป็นโครงสร้าง Tensegrity ระบบผสมที่อยู่ในกรอบของแนวความคิดสถาปัตยกรรม สามารถแบ่งออกเป็นได้ดังนี้

1.นิยามความหมายหรือคำจำกัดความของ Tensegrity คือ โครงสร้างที่ประกอบไปด้วยแรงอัดและแรงดึงแบบต่อเนื่องเข้าด้วยกัน ทำให้โครงสร้างสามารถก่อรูปและทรงตัวอยู่ได้ด้วยตัวเองจึงมีชื่อเรียกว่า โครงสร้างระบบแรงดึงสมบูรณ์ ซึ่งการถูกบีบอัดเกิดจากแรงภายในเครือข่ายของแรงดึง และชิ้นส่วนหลักที่ถูกบีบอัดจะไม่มีการสัมผัสกัน จึงทำให้มีชื่อเรียกอีกชื่อว่าโครงสร้างลอย จากคุณสมบัติเฉพาะในการประกอบชิ้นส่วนของโครงสร้างประเภทนี้ จึงทำให้โครงสร้างมีความยืดหยุ่นและมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักกับโครงสร้างประเภทอื่น

2.การแบ่งประเภทของ Tensegrity ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่นนี้จะแบ่งประเภทโดยพิจารณาจากทิศทางการขยายตัวของรูปแบบฟอร์มโครงสร้างเป็นหลัก โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบหลักๆ ได้แก่

2.1 Tensegrity ระบบโดม ระบบเหล่านี้ถือว่ามีรูปทรงเป็นทรงกลม เพราะเมื่อทำการต่อองค์ประกอบยูนิตย่อยเข้าไปจนครบระบบหรือต่อไปเรื่อยๆจนระบบครบเต็มไม่สามารถเพิ่มยูนิตย่อยเข้าไปได้อีก รูปทรงที่เกิดขึ้นจะได้เป็นทรงกลม และรูปแบบของยูนิตย่อยที่เข้ามาประกอบกันจะเป็นรูปทรงพื้นฐาน (Geodesic) โดย Tensegrity ประเภทนี้จะมี

คุณลักษณะของการกระกอบตัวหรือการเชื่อมต่อกันของแต่ละยูนิตที่มีลักษณะการยึดโยงกันที่เป็นแบบแผ่นผืนช่วยกันดึง ด้วยเหตุนี้ Tensegrity ระบบโดมจึงจำเป็นจะต้องมีรูปทรงที่เป็นทรงกลมเพราะต้องอาศัยแรงที่คอยบีบรัดโดยทั่วกัน เพื่อดันตัวให้โครงสร้างสามารถคงรูปทรงตัวอยู่ได้

แต่ Tensegrity ระบบโดม ก็มีข้อแม้ของวิธีการต่อยูนิต เมื่อการต่อยูนิตย่อยที่ไม่มีความสมมาตรกัน ความสมดุลที่เกิดจากการหักล้างกันของแรงภายในจึงไม่เกิดขึ้น โครงสร้างจึงขาดความสเถียรภาพไม่อาจรักษาสมดุลได้เต็มประสิทธิภาพเหมือนดังเดิม

2.2 Tensegrity ระบบเส้น ระบบเหล่านี้ถือว่ามีรูปทรงที่เป็นเส้น เพราะ Tensegrity ประเภทนี้มีลักษณะการเชื่อมต่อของยูนิตย่อยแบบมีทิศทาง โดยลักษณะการเชื่อมต่อของยูนิตย่อยจะใช้วิธีคล้ายกับการดีดตัวเพื่อเพิ่มระยะ ดังนั้น Tensegrity ประเภทนี้จึงต้องมีทิศทางของแรงดีดตัวเพื่อการถ่ายแรงให้กระจายไปได้ทั่วถึงทั้งโครงสร้าง จึงทำให้รูปลักษณ์โดยรวมของโครงสร้างมีลักษณะเป็นเส้น และเมื่อพิจารณาเข้าไปในยูนิตย่อยของ Tensegrity ระบบเส้น จะมีจุดที่สำคัญของการเชื่อมต่อยูนิตย่อยเข้าด้วยกัน โดย Tensegrity ระบบเส้นจะมีลักษณะในการเชื่อมต่อที่เป็น 3 มิติ เพียงหนึ่งหน่วยยูนิตย่อยของ Tensegrity ระบบเส้น ก็สามารถที่จะคงรูปอยู่ได้และมีความสเถียรสมบรูณ์ และอีกหนึ่งความสามารถของ Tensegrity ระบบเส้น คือการกำหนดทิศทางของการต่อเพิ่มจำนวนยูนิตย่อยได้ด้วยการการบิดหมุนหรือการเลี้ยว ซึ่งสองสิ่งนี้คือสวนสำคัญที่ต้องใช้ร่วมกันในการที่จะบังคับควบคุม Tensegrity ระบบนี้

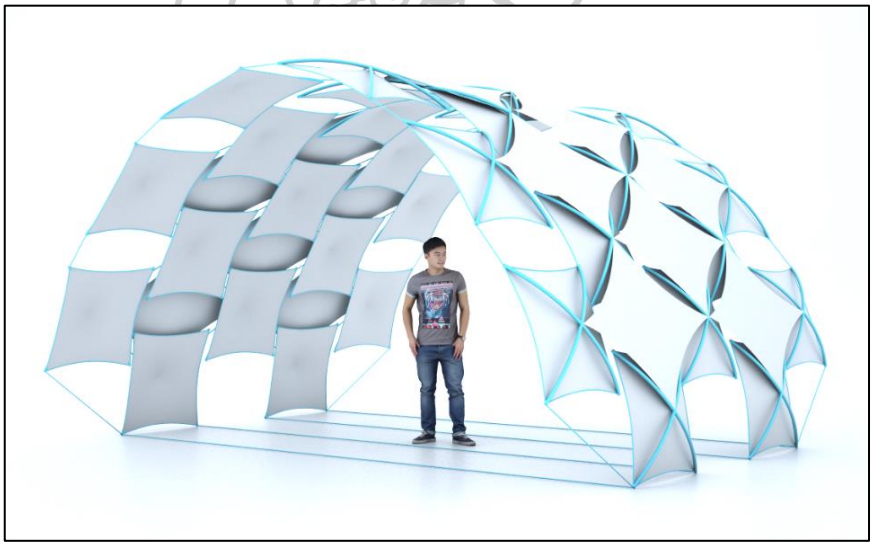
จากคุณลักษณะของการเชื่อมต่อยูนิตที่มีความหลากหลายทางมิติการเชื่อมต่อ ทำให้โครงสร้างระบบนี้มีความแข็งแรง และโครงสร้างระบบนี้ยังสามารถกำหนดทิศทางการบิดหมุนหรือเลี้ยวได้ แต่อีกหนึ่งจุดที่ควรเป็นข้อพิจารณาในการเลือกใช้โครงสร้างระบบนี้ คือ ขั้นตอนในการประกอบติดตั้งที่มีความซับซ้อนและยากในการจัดชิ้นส่วนให้เข้ารูปโดยเฉพาะงานที่เกี่ยวกับการรับน้ำหนักมากๆ

2.3 Tensegrity ระบบเดี่ยว ถือเป็นระบบที่มีความซับซ้อนในโครงสร้างน้อยที่สุด เข้าใจได้ง่าย เป็นระบบที่จบภายในตัวเอง กล่าวคือ ทั้งระบบจะมีเพียงแค่ยูนิตย่อยยูนิตเดียว ส่วนการเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนหรือการขยายขนาดจะกระทำภายในชุดโครงสร้างแรงดึงชุด

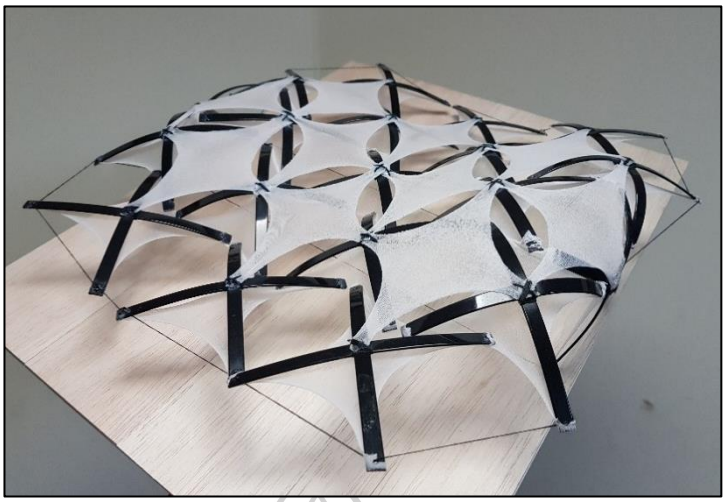
เดียวกัน การเพิ่มจำนวน ณ ที่นี้คือการเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนที่รับแรงอัดเพิ่มเข้าไปในโครงสร้างชุดเดียวกัน และมีวิธีการในการรับแรงอัดในแนวแรงเดียวกัน

และด้วยคุณลักษณะของการเพิ่มชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่รับแรงอัดภายในโครงสร้าง โดยที่แนวเส้นรับแรงดึงยังมีจำนวนเท่าเดิม ผลคือการที่ทำให้โครงสร้างประเภทนี้มีความมั่นคงแข็งแรง แต่ในบางรูปทรงของ Tensegrity ระบบนี้ การเพิ่มจำนวนเสารับแรงอัดในโครงสร้างบางรูปแบบ อาจทำให้พื้นที่ใช้งานภายในโครงสร้างลดลง อันเนื่องมาจากเสารับแรงอัดที่พาดไปมา จึงทำให้ไม่สามารถใช้พื้นที่ประกอบกิจกรรมได้อย่างเต็มที่ สิ่งนี้จึงถือว่าเป็นจุดที่ต้องพิจารณาในการเลือกรูปทรง Tensegrity ที่จะนำมาใช้งานในแง่สถาปัตยกรรม

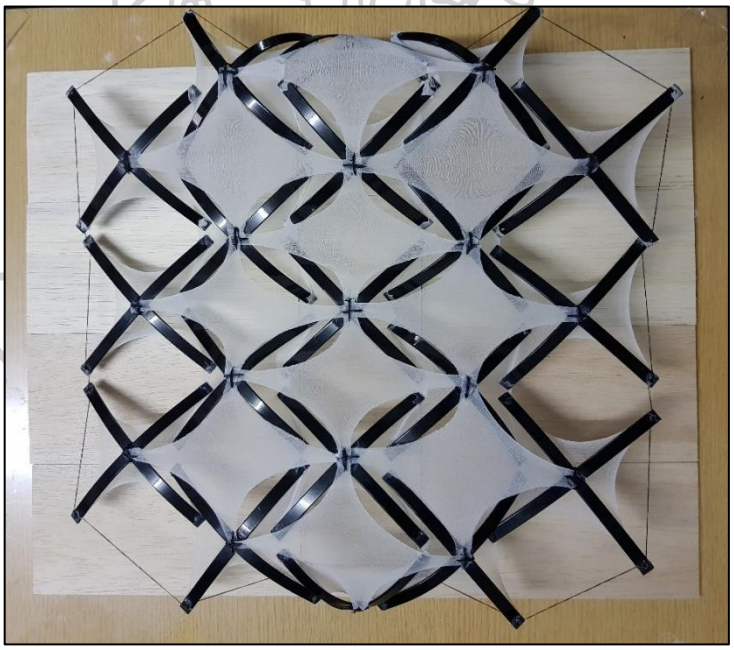
3. ผลการทดลอง Tensegrity ระบบผสม



ภาพที่ 92 แบบจำลอง Tensegrity ระบบผสม



ภาพที่ 93 หุ่นจำลอง Tensegrity ระบบผสม



ภาพที่ 94 หุ่นจำลอง Tensegrity ระบบผสม

ภาพที่ 95 หุ่นจำลอง Tensegrity ระบบผสม

จากกระบวนที่การนำองค์ความรู้ทางด้าน Tensegrity ที่มีอยู่เดิม นำมาพัฒนาต่อยอด โดยการนำคุณลักษณะบางอย่างจาก Tensegrity หลายๆประเภทเข้ามารวมกัน เพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการทางรูปแบบหรือรูปทรงในงานทางสถาปัตยกรรม โดยการออกแบบโครงสร้าง Tensegrity ให้มีลักษณะเป็นศาลารูปทรงหลังคาโค้ง อันเนื่องมาจากด้วยคุณลักษณะของรูปทรงหลังคาโค้ง ถือเป็นรูปทรงที่ Tensegrity ทั้ง 3 ระบบที่เคยมีมาไม่สามารถทำให้มีรูปทรงเป็นลักษณะนี้ได้ และรูปทรงหลังคาโค้งยังถือว่าเป็นรูปทรงที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดได้ในระดับหนึ่ง

ซึ่งจากผลการทด Tensegrity ระบบผสม จะใช้แนวทางในการวางตัวยูนิตเมื่อเพิ่มจำนวนแบบ Tensegrity ระบบโดม แต่มีระบบที่ยึดโยงแรงดึงแบบ Tensegrity ระบบเส้น ซึ่งด้วยคุณลักษณะที่งสองประการนี้ จึงทำให้ Tensegrity ระบบผสมสามารถเพิ่มลดจำนวนยูนิตได้ตามที่ต้องการและส่งผลให้ทำการควบคุมรูปทรงโครงสร้างได้

ข้อเสนอแนะจากการศึกษาและการออกแบบ

ข้อเสนแนะในที่นี้ ถือเป็นแนวทางต่อไปสำหรับผู้ที่สนใจโครงสร้าง Tensegrity มีดังต่อไปนี้

1. หลักการทำงานของโครงสร้าง Tensegrity คือการใช้แรงอัดและแรงดึงในการทำงานร่วมกัน การกำหนดความแข็งแรงของโครงสร้าง จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้ทั้งชิ้นส่วนที่รับแรงอัดและแรงดึงที่สัมพันธ์กัน ในทางกลับกันความแข็งแรงของเนื้อวัสดุก็เป็นสิ่งที่เพิ่มอุปสรรคในการติดตั้งโครงสร้างเช่นเดียวกัน

2. Tensegrity คือโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยแรงดึงแบบต่อเนื่อง หากจุดใดจุดหนึ่งของโครงสร้างเกิดการชำรุดเสียหาย ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงอัดหรือโดยเฉพาะกับชิ้นส่วนที่รับแรงโครงสร้างโดยรวมจะไม่สามารถรักษาสมดุลได้อีกต่อไป

3. ควรมีการเลือกใช้วัสดุในการประกอบชิ้นส่วนให้มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น จากผลงานการทดลองครั้งนี้ จะสามารถทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมั่นคงยิ่งขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร

รายการอ้างอิง

ADRIAENSSENS, S. M. L. a. B., M.R. . (2001). Tensegrity spline beam and grid shell structures, pp. 29-36.

ARMSTRONG, R. (2004). "**Untapped potential Unpublished BArch dissertation.**" Queen's University Belfast.

C.J., K. (1980).

Fuller, B. (1986). APPLEWHITE, E.J. *Synergetics dictionary*. with an introduction and appendices: New York.

FULLER, R. B. (1962).

FULLER, R. B. (1964).

FULLER, R. B. (1967).

FULLER, R. B. (1975).

Gengnagel. (2002). Structure-Sculpture.

KITTNER, C., & , Q., S.R. (1988).

Richard Buckminster Fuller, David Georges Emmerich, Kenneth D. Snelson. เข้าถึงเมื่อ 10 มกราคม 2561 เข้าถึงได้จาก https://patents.google.com/patent/US3063521A/en

YAMADA, T., RICHIERT, D., TUMMINIA, S. J., & RUSSELL, P. **Explore scientific, technical, and medical research on ScienceDirect.** เข้าถึงเมื่อ 2017. เข้าถึงได้จาก http://www.sciencedirect.com

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิษุวัต มาลัย
วัน เดือน ปี เกิด	14 ธันวาคม 2534
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2558 สำเร็จการศึกษาสถาปัตยกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ปัจจุบัน	272 หมู่ 1 ซอยพะเนาว์ 1 ตำบลจอหอ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30310

มหาวิทยาลัยศิลปากร