การก่อสร้างโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษ

นายวุฒิกร สุทธิอาภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

Construction Method of Floor Supporting Structure from Paper Tube

Mr. Wuthikorn Suthiapa

A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Architecture Program in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright to Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การก่อสร้างโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษ
โดย	นายวุฒิกร สุทธิอาภา
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ชลธี อิ่มอุดม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต นิตยะ

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ศักดิ์ วัฒนสินธุ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่นรัชฎ์ กาญจนัษฐิติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ชลธี อิ่มอุดม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต นิตยะ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. จญาดา บุณยเกียรติ)

วุฒิกร สุทธิอาภา : การก่อสร้างโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษ. (Construction Method of Floor Supporting Structure from Paper Tube) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ ชลธี อิ่มอุดม, อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต นิตยะ

ปัจจุบันสภาพแวดล้อมเป็นสิ่งที่ทุกๆคนบนโลกนี้ต้องตระหนักและเข้าใจถึงปัญหาซึ่งมนุษย์ได้ทำลาย สภาพแวดล้อมหนักขึ้นทุกวัน บางครั้งการสร้างมลพิษหรือการทำลายสิ่งแวดล้อมก็ถูกกระทำไปโดยมิได้ตั้งใจ อาจจะด้วยความไม่รู้หรือไม่ทราบถึงตัวเลือกที่ดีกว่าในการรักษาสิ่งแวดล้อมก็เป็นได้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เองก็เช่นกัน อุตสาหกรรมการก่อสร้างนั้นก็เป็นวงการหนึ่งที่ก่อให้เกิดมลภาวะในหลายๆทาง เช่น ปัญหาฝุ่นควัน มลภาวะสารพิษ เป็นต้น งานวิจัยในบทความฉบับนี้จึงเป็นการนำเสนอทางเลือกของวัสดุที่เป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อมากขึ้น และได้นำเสนอท่อกระดาษเพื่อเป็นวัสดุทางเลือก

วิทยานิพนธ์เรื่อง การก่อสร้างโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษ ซึ่งแบ่งออกเป็นสามส่วน คือ 1. ข้อมูลของแหล่งในการได้มาซึ่งท่อกระดาษและผลการวิจัยของท่อกระดาษกับการก่อสร้าง 2. การทดสอบคุณลักษณะของท่อกระดาษ(ขนาด ความแข็งแรง การเปรียบเทียบ) 3. การทดลองก่อสร้างโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษ อย่างไรก็ตามแม้ว่าในการทดสอบจะได้ผลออกมาว่าท่อกระดาษที่มีใช้อยู่ ในประเทศไทยนั้นมีความแข็งแรงคงทนน้อยกว่าของต่างประเทศ (เช่นญี่ปุ่น และสหรัฐฯ) แต่ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนั้นสามารถเอาไปใช้ในการออกแบบได้เป็นอย่างดี จึงเชื่อว่าแม้ท่อกระดาษในไทยจะไม่แข็งแรงเท่า ก็ยังสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทางโครงสร้างได้ ดังเช่นในการทดลอง ก่อสร้างโครงสร้างเพื่อรับพื้นจากท่อกระดาษนั้น ในครั้งที่ 1 นั้น โครงสร้างไม่สามารถรับน้ำได้เพราะความ ผิดพลาด ในข้อต่อไม้ที่นำมาใช้ คือห่วงโลหะที่ขึงสลิงนั้นได้ง้างออกมากเกินไปทั้งโครงสร้างจึงพังลงมา แต่ในการทดลองครั้งที่สามนั้น โครงสร้างทั้งหมดในช่วงพาดที่ 4.4X4.4 เมตร สามารถรับน้าหนักได้ถึง 381.91 กิโลกรัมจึงถึงจุดวิบัติ แต่จากการคำนวณด้วยแนวคิดในการลดความยาวช่วงพาดด้านหนึ่งลงเพื่อเสริมความแข็งแรงทำให้ทราบว่าในพิกัดช่วงพาดที่ 4.4x2.4 เมตรนั้น ท่อกระดาษจะสามารถรับน้ำหนักได้ถึง 959.48 กิโลกรัมจึงถึงจุดวิบัติ ผลการคำนวณนี้จึงทำให้ทราบว่าท่อกระดาษนั้นสามารถนำมาใช้เป็นโครงสร้างอาคารเพื่อใช้งานได้เช่นเดียวกับวัสดุอื่นๆ

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา สถาปัตยกรรม ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่ออ.ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

##5274147425: MAJOR ARCHITECTURE
KEYWORDS: PAPER TUBE/ FLOOR/ STRUCTURE

WUTHIKORN SUTHIAPA: CONSTRUCTION METHOD OF FLOOR SUPPORTING STRUCTURE FROM PAPER TUBE. ADVISOR: ASSOC. PROF. CHONLATHI IM-UDOM, CO-ADVISOR: CHAWALIT NITIYA, 136 pp

-Humans, whether inadvertently or intentionally, have been a major factor affecting the world's environment. More and more resources are being exploited. Resulting in pollution and environmental degradation. Architecturally, the use of certain materials contributes to this problem. Construction industry generating pollutes such as dust, poisonous substances, etc.

Construction method of floor supporting structure from paper tube is a thesis which focuses on three vital areas--1) Information on sources of paper tubes and a research outcome on paper tubes and construction; 2) A quality test of paper tubes i.e. size, strength, and the comparison of distinct varieties of tubes; 3) A construction experiment using paper tubes as a floor structure. Even though the results of the experiment indicated that the paper tubes available and in use in Thailand are not as durable as the paper tubes used internationally e.g. Japan and the US, data derived from the experiment can still be very beneficial for the design process. The less sturdy, domestically used paper tubes can also be used as materials for constructing a floor structure. In an initial experiment in which paper tubes were used to construct a floor supporting structure, the structure could not hold the weight due to a wooden joint malfunction. A metal ring was used to place tension on a rope drawn apart from both ends. And structure collapsed. In another experiment, a 440 x 440 centimeter structure width was able to suspend a weight up to 381.91 kg. up to the failure point, but using petaflop to reduce the length of the stripe down the side to augment strength of the structure, revealed that the paper tubes could actually hold a weight of up to 959.48 kg. at the 440 x 240 coordinate. It can therefore be concluded from the experiment that paper tubes are highly appropriate for used in the construction of structures, and can certainly be used an alternative construction material in the future.

Department Architecture — Student's signature .....
Field of Study Architecture — Advisor's signature .....
Academic Year 2012 — Co-advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การก่อสร้างโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษ” สำเร็จลุล่วงลงได้ เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาให้ข้อมูล เสนอแนะ ให้การปรึกษาแนะนำ แสดงความคิดเห็น และให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสมอมา ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ชลธี อิ่มอุดม ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต นิตยะ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่นรัชฎ์ กาญจนัษฐิติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วร-ภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์ และดร. จญาดา บุณยเกียรติ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำชี้แนะในการสอบครั้งนี้

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ หน่วยทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ทดสอบวัสดุและเครื่องมือประกอบการทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณ สุวนิตย์ ภู่พันธ์ วิศวกรผู้แนะนำวิธีการและตรวจสอบภาคคำนวณ

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ให้การโอกาสในการศึกษาช่วยส่งเสริมสนับสนุน กระตุ้นเตือน และเป็นกำลังใจตลอดมาให้ผู้วิจัยจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลงได้

บทคัดย่อภาษาไทย…….…….…….…….. ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ…….…….…….……. ข

กิตติกรรมประกาศ…….…….…….…….. ค

สารบัญ

บทนำ…….…….…….…….……. 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา……. 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย……..…….…….. 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย……..…….……. 2

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น……..…….…… 3

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย……..…….……. 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ……..…….……. 3

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย……..…….……..…… 3

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย…….…….. 4

บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 แนวคิดและทฤษฎี……..…….…….. 5

2.2 Verb, Crisis: Twenty years of Emergency……. 8
Architecture (20 ปี กับสถาปัตยกรรมเพื่อการกู้ภัย)

2.3 ชิเกรุ บัน โดย Matilda McQuaid……..……. 11

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……..…….…….. 28

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 29

3.1 การสำรวจตลาดท่อกระดาษในประเทศไทย…….. 29

3.2 การออกแบบการทดลองเพื่อรับแรงของท่อกระดาษ…….. 34

บทที่ 4 ผลการทดลองการรับแรงของท่อกระดาษ 45

4.1 ผลการทดลองการรับแรงของท่อกระดาษ……..…… 45

4.2 การทดลองแรงอัด……..…….……..…… 45

4.3 การทดลองแรงดัด……..…….……..….. 48

4.4 การทดลองแรงดึง……..…….…… 50

4.5 ผลการเปรียบเทียบการทดลอง……..…….…… 51

4.6 ผลสรุปจากทดลองและข้อเสนอแนะ……..……. 53

บทที่ 5 การทดลองก่อสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้น 54
5.1 การทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้นครั้งที่ 1..... 54
5.2 การทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้นครั้งที่ 2..... 76
5.3 การทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้นครั้งที่ 3..... 83
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 91
6.1 การคำนวณในการทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษ..... 91
เพื่อรับพื้นครั้งที่ 2
6.2 การคำนวณในการทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษ..... 96
เพื่อรับพื้นครั้งที่ 3
6.3 อภิปรายผล..... 116
6.4 เปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่าง โครงสร้างที่ทำจาก..... 120
ท่อกระดาษ ไม้ และเหล็ก
6.5 ข้อเสนอแนะ..... 122
สารบัญตาราง
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบท่อกระดาษใช้แล้วในท้องตลาดกรุงเทพฯ..... 30
ตารางที่ 3.2 ราคาซื้อ/ขาย ท่อกระดาษใช้แล้วในท้องตลาดกรุงเทพฯ..... 30
ตารางที่ 3.3 ท่อกระดาษในกลุ่มธุรกิจสิ่งทอบริเวณพาหุรัด สำเพ็ง และราชวงศ์ 32
ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบราคาท่อกระดาษ ระหว่าง ของเก่า(มือสอง) กับ..... 33
ของใหม่ (มือหนึ่ง)
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการรับแรงอัด แรงดัด และแรงดึงของท่อกระดาษ... 45
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ของท่อกระดาษ แรงอัด และแรงอัดต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของ... 46
ท่อกระดาษขนาดเล็ก
ตารางที่ 4.3 พื้นที่ของท่อกระดาษ แรงอัดและแรงอัดต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย..... 46
ของท่อกระดาษขนาดใหญ่
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความสามรถในการรับแรงอัดระหว่างท่อกระดาษ..... 47
ญี่ปุ่นและท่อกระดาษไทย
ตารางที่ 4.5 แรงดัดที่กระทำกับท่อกระดาษ..... 48
ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการเปรียบเทียบรายคู่ของ..... 49
แรงดัดที่กระทำกับท่อกระดาษ
ตารางที่ 4.7 แรงดึงที่กระทำกับท่อกระดาษใหญ่..... 50

ตารางที่ 4.8 แรงกระทำต่อท่อกระดาษขนาดเล็กและขนาดใหญ่ จำแนก..... 51
ตามแรงที่มากระทำและความยาวของท่อกระดาษ
ตารางที่ 5.1 น้ำหนักที่โครงสร้างสามารถรับได้และประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไป.... 82
ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่าง โครงสร้างที่ทำจากท่อ..... 121
กระดาษ ไม้ และเหล็ก

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 เครื่องม้วนท่อกระดาษ……..……..……..... 7
ภาพที่ 2.2 สถาปนิกผู้ริเริ่มใช้ท่อกระดาษ ชิเกรุบัน……..……. 9
ภาพที่ 2.3 หนังสือ ชิเกรุ บัน……..……..……..…….. 11
ภาพที่ 2.4 ผลงานท่อกระดาษ Alvar Aulto Exhitbition และ Pape Arbor... 13
PTS-01 ในงาน World Expo ที่เมืองนาโกย่า ประเทศญี่ปุ่น
ภาพที่ 2.5 ผลงานท่อกระดาษ Library of Poet……..……..... 13
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างและภาพลายเส้นของท่อกระดาษ Paper House..... 14
ภาพที่ 2.7 การประกอบที่พักผู้ลี้ภัยของชาวรวันดาจากท่อกระดาษ (1)..... 15
ภาพที่ 2.8 การประกอบที่พักผู้ลี้ภัยของชาวรวันดาจากท่อกระดาษ (2)..... 16
ภาพที่ 2.9 อธิบายชิ้นส่วนและการประกอบที่พักผู้ลี้ภัยของชาวรวันดา..... 16
จากท่อกระดาษ
ภาพที่ 2.10 ผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศญี่ปุ่น..... 17
ภาพที่ 2.11 การประกอบท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศญี่ปุ่น... 18
ภาพที่ 2.12 ภาพลายเส้นของผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ใน..... 18
ประเทศญี่ปุ่น
ภาพที่ 2.13 ผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศตุรกี..... 19
ภาพที่ 2.14 ภาพลายเส้นผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses..... 19
ในประเทศตุรกี
ภาพที่ 2.15 ผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศอินเดีย..... 20
ภาพที่ 2.16 ภาพลายเส้นผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ใน..... 20
ประเทศอินเดีย
ภาพที่ 2.17 ผลงานท่อกระดาษ Paper Church……..……..... 21
ภาพที่ 2.18 ภาพลายเส้นผลงานท่อกระดาษ Paper Church……..… 21

ภาพที่ 2.19	ผลงานท่อกระดาษ Paper Dome และภาพลายเส้นแสดง..... รายละเอียดของชุดข้อต่อ	23
ภาพที่ 2.20	โครงสร้างภายในของ Paper Dome……..……....	23
ภาพที่ 2.21	ภาพลายเส้นของโครงสร้างหลังคาแบบ Waffle Concrete Slab...	24
ภาพที่ 2.22	ภาพจริงและภาพลายเส้นของ Nemunoki Children's Art..... Museum	25
ภาพที่ 2.23	Japan Pavilion Expo 2000 เมืองฮันโนเวอร์ ประเทศเยอรมัน.....	26
ภาพที่ 2.24	ภาพลายเส้นของ Japan Pavilion Expo 2000 เมืองฮันโนเวอร์.... ประเทศเยอรมัน	26
ภาพที่ 2.25	การก่อสร้างโครงสร้างของ Japan Pavilion Expo 2000 ..... เมืองฮันโนเวอร์ ประเทศเยอรมัน	26
ภาพที่ 2.26	โครงสร้างและภาพลายเส้นของอู่จอดเรือที่พัฒนาจากโครง..... สร้างของ Japan Pavilion	27
ภาพที่ 3.1	แบบแสดงสัดส่วนต่างๆเพื่อใช้กับตารางที่ 3.1……..……	29
ภาพที่ 3.2	ภาพภายในและด้านหน้าร้านของเก่า-ใต้ทางด่วนประชาอุทิศ.....	31
ภาพที่ 3.3	ภาพภายในและด้านหน้าร้านของเก่าป๋าห่อง-สุขสวัสดิ์76.....	31
ภาพที่ 3.4	ม้วนผ้าที่ใช้แกนเป็นท่อกระดาษ……..……..……	32
ภาพที่ 3.5	ร้านชัยเจริญ ค้าเชือกฟางและท่อกระดาษ……..……	33
ภาพที่ 3.6	ภาพแสดงลักษณะที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงอัดตาม…… แนวแกน	34
ภาพที่ 3.7	ภาพแสดงลักษณะที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรง..... อัดตามแนวแกน	35
ภาพที่ 3.8	แหล่งขายท่อกระดาษทั้งของใหม่และของใช้แล้ว…….....	36
ภาพที่ 3.9	สภาพภายในโรงงานผลิตท่อกระดาษและการขนส่งท่อกระดาษ...	36
ภาพที่ 3.10	ก่อนทำการตัดควรวาดเส้นรอบวงเพื่อให้การตัดมีความเที่ยงตรง..	37
ภาพที่ 3.11	ใช้เลื่อยมือเป็นเครื่องมือในการตัด……..……..……	38
ภาพที่ 3.12	ตรวจสอบความยาวของท่อกระดาษ……..……..	38
ภาพที่ 3.13	รอยตัดของท่อกระดาษหลังขัดตกแต่งแล้ว……..……..	39
ภาพที่ 3.14	เครื่องตัดเหล็กสำหรับขั้นตอนในการทำตัวจับปลายท่อ……	39
ภาพที่ 3.15	ตัวจับปลายท่อเมื่อแล้วเสร็จ……..…….....	40

ภาพที่ 3.16 ใช้ตะปูเกลียวหกเหลี่ยมเป็นตัวยึด……..…….…. 40
ภาพที่ 3.17 ระหว่างขั้นตอนการประกอบตัวจับเพื่อเข้ารับการทดสอบ..... 41
คุณสมบัติการรับแรงของท่อกระดาษ
ภาพที่ 3.18 รูปร่างเมื่อประกอบแกนเหล็กตัวจับเข้ากับปลายท่อกระดาษ..... 41
ภาพที่ 3.19 เครื่องทดสอบรุ่น Universal Testing Machine Amsler 20T..... 42
ขณะทำการทดสอบ
ภาพที่ 3.20 บรรยากาศภายในห้องทดสอบวัสดุที่ศูนย์ทดสอบวัสดุแห่ง..... 42
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาพที่ 3.21 เครื่องทดสอบรุ่น Universal Testing Machine Amsler 20T 43
ที่ใช้ในการทดสอบ
ภาพที่ 3.22 ท่อกระดาษที่ใช้ในการทดสอบ……..…….…… 43
ภาพที่ 4.1 การทดลองแรงอัดกับท่อกระดาษ……..……..... 46
ภาพที่ 4.2 แรงอัดที่กระทำต่อท่อกระดาษ……..……..…… 47
ภาพที่ 4.3 การทดลองแรงดัดกับท่อกระดาษ……..……..... 48
ภาพที่ 4.4 แรงดัดที่กระทำต่อท่อกระดาษ……..……..... 49
ภาพที่ 4.5 การทดลองแรงดึงกับท่อกระดาษ……..……..…… 50
ภาพที่ 4.6 แรงดึงที่กระทำต่อท่อกระดาษ……..……..... 50
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบการรับแรงในความยาวต่างๆของท่อกระดาษ..... 52
จำแนกตามแรงที่กระทำ
ภาพที่ 5.1 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการ..... 55
ทดลองที่1(1)
ภาพที่ 5.2 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการ..... 56
ทดลองที่1 (2)
ภาพที่ 5.3 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการ..... 57
ทดลองที่1 (3)
ภาพที่ 5.4 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการ..... 58
ทดลองที่1 (4)
ภาพที่ 5.5 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการ..... 59
ทดลองที่1 (5)

ภาพที่ 5.6	แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการทดลองที่1 (6)	60
ภาพที่ 5.7	การก่อสร้างโดยใช้เครื่องมือที่มีทั่วไป	61
ภาพที่ 5.8	แม่แบบในการเจาะรูบนไม้ใช้แผ่นพลาสติกเพื่อความแม่นยำ	61
ภาพที่ 5.9	นำแผ่นพลาสติกแม่แบบวางทาบและทำเครื่องหมายลงบนแผ่นไม้	61
ภาพที่ 5.10	เจาะรูที่เครื่องหมายที่ทำไว้ โดยให้ระวังการเจาะไม่ได้ฉาก	62
ภาพที่ 5.11	สว่านแทนที่ใช้เพื่อความแม่นยำให้กับชิ้นงาน	62
ภาพที่ 5.12	การปฏิบัติขณะเจาะแผ่นไม้ด้วยสว่านแท่น	62
ภาพที่ 5.13	เดือยที่เจาะรูเรียบร้อยแล้ว	63
ภาพที่ 5.14	ทำเครื่องหมายที่บล๊อกไม้เพื่อเจาะรูตรงจุดกึ่งกลาง	63
ภาพที่ 5.15	นำบล๊อกไม้เข้าสว่านแท่นเพื่อเจาะรู	63
ภาพที่ 5.16	สภาพบล็อกไม้เมื่อเจาะรูเรียบร้อยแล้ว	63
ภาพที่ 5.17	ตีเส้นวัดแผ่นไม้	64
ภาพที่ 5.18	ไขสกรูนำลงไปก่อน	64
ภาพที่ 5.19	จะเห็นตะปูยื่นออกมาเล็กน้อยที่อีกด้านหนึ่ง	64
ภาพที่ 5.20	ให้จัดระนาบของบล๊อกตามเส้นที่ขีดไว้	64
ภาพที่ 5.21	ตอกลงไปด้วยความแรงพอเหมาะจะได้รอยจุดที่ต้องเจาะ	65
ภาพที่ 5.22	เจาะรูที่ได้ให้ลึกพอประมาณ	65
ภาพที่ 5.23	ยึดสกรูเข้ากับแผ่นไม้	65
ภาพที่ 5.24	จัดวางบล๊อกไม้ให้พอดีอีกครั้ง	65
ภาพที่ 5.25	ทำการเจาะรูที่เหลืออีกสามรูพร้อมยึดสกรูให้เรียบร้อย	66
ภาพที่ 5.26	สภาพเมื่อเสร็จเรียบร้อยยึดสกรูทั้งสี่แล้ว	66
ภาพที่ 5.27	เจาะรูที่บล๊อกเชื่อมต่อกับท่อกระดาษ	66
ภาพที่ 5.28	เจาะขยายรูที่เดือยไม้	66
ภาพที่ 5.29	นำสกรูยึดเข้ากับเดือยโดยไขลงไปจนสุด	67
ภาพที่ 5.30	สภาพเมื่อกรูเข้าที่ดีแล้ว	67
ภาพที่ 5.31	นำไปจุ่มกาวลาเท็กซ์ก่อนติดตั้งเพื่อให้สกรูไม่ลื่นหลุดออกจากบล๊อกไม้	67

ภาพที่ 5.32	ติดตั้งเดือยเข้ากับบล๊อกไม้โดยใช้มือหมุนเข้าไป.....	67
ภาพที่ 5.33	สภาพเมื่อติดตั้งดีแล้ว.....	68
ภาพที่ 5.34	บล๊อกไม้ส่วนรับท้องคานโดยใช้ขั้นตอนเดียวกับการประกอบ.... เดือยที่แสดงไว้ก่อนหน้า	68
ภาพที่ 5.35	ชิ้นส่วนข้อต่อไม้รับเสาท้องคาน.....	68
ภาพที่ 5.36	ชิ้นส่วนข้อต่อไม้แป้นรับพื้นกลางช่วงเสา.....	68
ภาพที่ 5.37	ชิ้นส่วนข้อต่อไม้ปลายเสา.....	69
ภาพที่ 5.38	ชิ้นส่วนข้อต่อไม้กลางคาน.....	69
ภาพที่ 5.39	จัดวางชิ้นส่วนข้อต่อต่างๆเพื่อง่ายต่อการประกอบ	69
ภาพที่ 5.40	ตัดท่อกระดาษตามความยาวที่กำหนดไว้เพื่อนะไปติดตั้งกับ..... ส่วนข้อต่อไม้	70
ภาพที่ 5.41	การติดตั้งใช้การสวมท่อกระดาษลงไปในเดือยไม้.....	70
ภาพที่ 5.42	การติดตั้งตัวขึงลวดสลิง.....	71
ภาพที่ 5.43	การขึงตึงใช้เกลียวเร่งขันสลิงให้ตึง.....	71
ภาพที่ 5.44	สภาพเมื่อขึงตึงโครงสร้างทั้งหมดแล้ว.....	72
ภาพที่ 5.45	แผ่นกระดาษลังที่ใช้ทำพื้น.....	72
ภาพที่ 5.46	การยึดกระดาษลัง	72
ภาพที่ 5.47	ทำการยกโครงสร้างทั้งหมดให้ลอยขึ้นเพื่อเตรียมบันทึกผล.....	73
ภาพที่ 5.48	การปูแผ่นพื้นกระดาษลัง.....	73
ภาพที่ 5.49	อิฐมวลเบาที่จะใช้ทดสอบโครงสร้าง.....	74
ภาพที่ 5.50	ระหว่างการทดสอบค่อยๆเรียงอิฐเพื่อเฉลี่ยการรับน้ำหนักของ..... โครงสร้าง	74
ภาพที่ 5.51	โครงสร้างพังจากการทดสอบ.....	74
ภาพที่ 5.52	แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการ..... ทดลองที่2	77
ภาพที่ 5.53	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	78
ภาพที่ 5.54	การเตรียมการทดลองการทดลองที่ 5.3 (1)	79
ภาพที่ 5.55	การเตรียมการทดลองการทดลองที่ 5.3 (2)	79
ภาพที่ 5.56	การทดลองคานขนาด 440 เซนติเมตร.....	80

ภาพที่ 5.57	การทดลองคานขนา 340 เซนติเมตร.....	80
ภาพที่ 5.58	การทดลองคานขนาด 240 เซนติเมตร.....	81
ภาพที่ 5.59	สภาพโครงสร้างหลังจุดวิบัติ.....	81
ภาพที่ 5.60	แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการ..... ทดลองที่ 3	84
ภาพที่ 5.61	โครงเหล็กกล่องซึ่งใช้เป็นโครงสร้างรับพื้น.....	85
ภาพที่ 5.62	การจัดวางโครงเหล็ก.....	85
ภาพที่ 5.63	การตัดท่อกระดาษและประกอบเป็นท่อตั้ง.....	86
ภาพที่ 5.64	ท่อตั้งที่ประกอบสมบรูณ์.....	86
ภาพที่ 5.65	การประกอบชุดคาน.....	87
ภาพที่ 5.66	ข้อต่อเชื่อมท่อกระดาษกับโครงสร้างเหล็ก.....	87
ภาพที่ 5.67	ตรวจสอบระดับของโครงสร้างท่อกระดาษ.....	87
ภาพที่ 5.68	ส่วนคานรับน้ำหนักของท่อกระดาษ.....	88
ภาพที่ 5.69	การวางไม้อัดบนโครงสร้าง.....	88
ภาพที่ 5.70	วางน้ำหนักบนโครงสร้างท่อกระดาษ.....	89
ภาพที่ 5.71	การวัดระยะที่คานตก.....	89
ภาพที่ 5.72	ผลลัพธ์จากการรับน้ำหนักของโครงสร้างท่อกระดาษ.....	89
ภาพที่ 6.1	ขนาดของท่อกระดาษที่ใช้ในการทดลอง.....	91
ภาพที่ 6.2	ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรใน..... การทดลองที่ 2	92
ภาพที่ 6.3	แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว ..... 440 เซนติเมตรในการทดลองที่ 2	92
ภาพที่ 6.4	ขนาดและองศาของคานความยาว 340 เซนติเมตรใน..... การทดลองที่ 2	93
ภาพที่ 6.5	แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 340..... เซนติเมตรในการทดลองที่ 2	94
ภาพที่ 6.6	ขนาดและองศาของคานความยาว 4.4 เมตรในการทดลองที่ 2....	95
ภาพที่ 6.7	แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 340 ..... เซนติเมตรในการทดลองที่ 2	95

ภาพที่ 6.8	แสดงการแยกส่วนการคำนวณของโครงสร้าง.....	97
ภาพที่ 6.9	ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ..... Truss B ในการทดลองที่3	98
ภาพที่ 6.10	แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 440 ..... เซนติเมตรส่วนของTruss B ในการทดลองที่ 3	98
ภาพที่ 6.11	ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ..... Truss A ในการทดลองที่ 3	99
ภาพที่ 6.12	แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว ..... 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss A ในการทดลองที่ 3	100
ภาพที่ 6.13	ขนาดและองศาของคานความยาว 3.4 เมตรส่วนของ Truss B....	101
ภาพที่ 6.14	แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว ..... 340 เซนติเมตรส่วนของ Truss B จากการคำนวณ	102
ภาพที่ 6.15	ขนาดและองศาของคานความยาว 340 เซนติเมตรส่วนของ..... Truss A	103
ภาพที่ 6.16	แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว ..... 340 เซนติเมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ	103
ภาพที่ 6.17	ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ..... Truss B	104
ภาพที่ 6.18	แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว ..... 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss B จากการคำนวณ	105
ภาพที่ 6.19	ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ..... Truss A	106
ภาพที่ 6.20	แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว..... 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ	106
ภาพที่ 6.21	ขนาดและองศาของคานความยาว 340 เซนติเมตรส่วนของ..... Truss B	107
ภาพที่ 6.22	น้ำหนักบรรทุกจรที่ที่รับได้ในแนวแกนของคานความยาว..... 340 เซนติเมตรส่วนของ Truss B จากการคำนวณ	108
ภาพที่ 6.23	ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ..... Truss A	109

ภาพที่ 6.24 น้ำหนักบรรทุกจรที่ที่รับได้ในแนวแกนของคานความยาว..... 109
440 เซนติเมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ
ภาพที่ 6.25 ขนาดและองศาของคานความยาว 240 เซนติเมตรส่วนของ..... 110
Truss A
ภาพที่ 6.26 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 111
240 เซนติเมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ
ภาพที่ 6.27 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ..... 112
Truss B
ภาพที่ 6.28 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 440..... 112
เซนติเมตรส่วนของ Truss B จากการคำนวณ
ภาพที่ 6.29 ขนาดและองศาของคานความยาว 240 เซนติเมตรส่วนของ..... 113
Truss A
ภาพที่ 6.30 น้ำหนักบรรทุกจรที่ที่รับได้ในแนวแกนของคานความยาว..... 114
240 เซนติเมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ
ภาพที่ 6.31 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ..... 115
Truss B
ภาพที่ 6.32 น้ำหนักบรรทุกจรที่ที่รับได้ในแนวแกนของคานความยาว..... 115
440 เซนติเมตรส่วนของ Truss Bจากการคำนวณ
รายการอ้างอิง..... 123
ภาคผนวก..... 124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 136

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาสภาพแวดล้อมเป็นสิ่งที่ทุกๆคนบนโลกนี้ต้องตระหนักและเข้าใจถึงปัญหาซึ่งมนุษย์ได้ทำลายสภาพแวดล้อมหนักขึ้นในทุกวัน ตั้งแต่ยุคปฏิวัตอุตสาหกรรมอัตราของการก่อมลพิษก็ทวีตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่บางครั้งการสร้างมลพิษหรือการทำลายสิ่งแวดล้อมก็ถูกกระทำไปโดยมิได้ตั้งใจ อาจจะเป็นด้วยความไม่รู้ หรืออาจจะเป็นเพราะว่าไม่อาจรับรู้ว่ามีทางเลือกที่ดีกว่าในการอยู่ร่วมกันบนโลกใบนี้อย่างเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมก็เป็นได้

ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างเองก็เป็นวงการหนึ่งที่มีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่นการผลิตปูนซีเมนต์ ได้ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องมลภาวะทางอากาศ ปัญหาฝุ่น แค่การผลิตปูนซีเมนต์อย่างเดียวก็ทำให้สิ่งแวดล้อมถูกทำลายไปได้มากมายอย่างไม่น่าเชื่อ นี่ยังไม่นับไปถึงอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ อุตสาหกรรมพลาสติกและอื่นๆ

ด้วยเหตุดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นถึงการนำเสนอวัสดุซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมไว้เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งแก่การออกแบบทางสถาปัตยกรรม โดยได้นำ"ท่อกระดาษ"เข้ามาเป็นตัวเลือกในการวิจัย ถึงแม้ว่าท่อกระดาษจะยังมีข้อจำกัดในการออกแบบอยู่มาก แต่หากมีการเริ่มพัฒนาเทคนิคและวิธีการอย่างจริงจังและต่อเนื่อง ท่อกระดาษจะกลายเป็นวัสดุที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างได้จริงอย่างแน่นอน

ท่อกระดาษเป็นสิ่งที่หลงเหลือมาจากอุตสาหกรรมหลายชนิดจึงจัดว่าเป็นวัสดุเหลือใช้ แต่โดยโครงสร้างแล้ว ท่อกระดาษนับว่ามีความแข็งแรงเป็นอย่างมาก

ทุกๆที่ในโลกแม้แต่ประเทศด้อยพัฒนาก็สามารถหาท่อกระดาษได้จากอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ หรืออะไรก็ตามที่ต้องการแกนม้วน ท่อกระดาษง่ายต่อการขนส่งและจัดการเพื่อก่อสร้าง สามารถใช้เลื่อยหั่นได้โดยไม่ต้องมีเครื่องมือมากมายในการประกอบ เพียงแต่ส่วนที่สำคัญที่สุดในการประกอบท่อกระดาษเป็นสถาปัตยกรรมจะอยู่ที่การออกแบบข้อต่อนั่นเอง จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าท่อกระดาษนั้นมีความสะดวกพอต่อการก่อสร้างและไม่ต้องการเครื่องมือเครื่องไม้มากอย่างวิธีการก่อสร้างแบบอื่นๆ จึงทำให้ท่อกระดาษสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเทคนิคการก่อสร้างแบบดั่งเดิมเช่นการก่อสร้างโครงสร้างไม้ไผ่ได้อย่างไม่ยากเย็นนัก

จึงน่าเสียดายที่ท่อกระดาษยังถูกมองในแง่ลบจากสถาปนิกต่างๆว่าเป็นโครงสร้างที่ไม่ถาวรและไม่แข็งแรงพอจะใช้ในงานจริงได้นอกจากจะทำไว้จัดแสดงหรือเป็นเพียงส่วนประดับอาคารเท่านั้น

จากผลงานของสถาปนิก ชิเกรุ บัน ได้ทำให้เห็นแล้วว่าท่อกระดาษมีความสามารถพอที่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้างเพื่อใช้งานจริงได้อย่างดี หากแต่ในงานออกแบบทั้งหมดจากการศึกษาพบว่า ยังไม่มีผลงานใดที่มีการออกแบบพื้นในแนวระนาบเพื่อยกระดับเป็นชั้นสองหรือชั้นสามแต่อย่างใด

หากว่าท่อกระดาษสามารถพัฒนาจนก่อสร้างเป็นพื้นในแนวระนาบซึ่งมีช่วงพาดเพียงพอต่อการใช้งานได้สำเร็จ จะทำให้วิธีการก่อสร้างโดยใช้ท่อกระดาษสามารถสร้างเป็นโครงสร้างในลักษณะหลายชั้นได้ จึงเห็นว่าในส่วนของการพัฒนาโครงสร้างพื้นในแนวระนาบโดยใช้โครงสร้างท่อกระดาษนั้น มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งหากจะพัฒนาโครงสร้างท่อกระดาษต่อไปให้สามารถใช้งานได้จริง

เป้าหมายของการวิจัยนี้จึงเป็นการหาวิธีการก่อสร้างพื้นในแนวระนาบที่มีช่วงพาดเพียงพอต่อการใช้งานซึ่งอาจจะเป็นช่วงพาดที่มีขนาดตั้งแต่ 4 เมตรขึ้นไปโดยใช้โครงสร้างท่อกระดาษเป็นวัสดุหลัก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพิสูจน์และทดสอบวิธีการก่อสร้างพื้นอาคารโดยใช้โครงสร้างท่อกระดาษในประเทศไทยโดยแบ่งวัตถุประสงค์ออกได้ดังนี้

1.1 เพื่อทดสอบวิธีการก่อสร้างโครงถักแบบขึงในการสร้างพื้นอาคารซึ่งมีช่วงพาดเพียงพอต่อการใช้งานโดยใช้ โครงสร้างท่อกระดาษ พร้อมทั้งประเมินความคุ้มค่าต่อการเลือกใช้วัสดุท่อกระดาษ

1.2 เพื่อทดสอบความคงทนของโครงสร้างท่อกระดาษที่มีอยู่ในประเทศไทยจัดทำเป็นคุณลักษณะที่เป็นมาตรฐาน

1.3 เพื่อทดลองหาประสิทธิภาพของวิธีการสร้างพื้นอาคารโดยใช้โครงสร้างท่อกระดาษ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตด้านวัสดุและการก่อสร้าง

- ใช้ท่อกระดาษที่หาได้ในประเทศไทยเท่านั้น

2. ขอบเขตด้านพื้นที่

- ทดลองก่อสร้างในภูมิอากาศ อุณหภูมิ และความชื้นของประเทศไทย

3. ขอบเขตด้านเนื้อหา

- งานวิจัยจากการหาข้อมูลแหล่งวัสดุและการออกแบบโครงสร้าง
- งานวิจัยจากการทดสอบคุณลักษณะของท่อกระดาษ
- งานวิจัยจากการทดลองก่อสร้างและผลทดสอบผลการใช้งาน

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ท่อกระดาษต้องผลิตในประเทศไทย

2. เครื่องมือที่ใช้ต้องไม่เป็นเครื่องมือพิเศษหรือเครื่องมือหรืออุปกรณ์ขนาดใหญ่และใช้บุคคลเพียงคนเดียวได้ในการก่อสร้าง

3. กระบวนการในการประกอบโครงสร้างท่อกระดาษควรจะง่าย ทั้งการผลิต การขนส่ง และการก่อสร้าง ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในทุกกรณี

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

1. ท่อกระดาษเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีมาตรฐานขนาดของท่อกระดาษเองอยู่ก่อนแล้วทำให้ต้องออกแบบตามขนาดเดิม

2. กระดาษไม่ทนต่อความชื้นซึ่งอากาศร้อนชื้นแบบไทยจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของท่อกระดาษ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดการพัฒนาวิธีการก่อสร้างโดยใช้โครงสร้างจากท่อกระดาษสำหรับอาคารตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป

2. ได้ข้อพิสูจน์ในความคุ้มค่าของการเลือกใช้วัสดุเหลือใช้ประเภทท่อกระดาษ

3. ทราบถึงข้อจำกัดของโครงสร้างท่อกระดาษ และสามารถประเมินได้ถึงประสิทธิภาพในการก่อสร้างโดยใช้วัสดุจากท่อกระดาษเพื่อนำไปใช้ในการประมาณการเวลาต้นทุน และปัญหาในงานออกแบบจากท่อกระดาษต่อไป

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

ใช้การวิจัยเชิงประจักษ์(Empirical research) ซึ่งเป็นการวิจัยเชิงสังเกตโดยมีตัวแปรเป็นกระบวนการที่นำมาใช้ในการวิจัยในการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆคือ

1. ขั้นตอนหาแหล่งวัสดุ เนื่องจากท่อกระดาษเป็นวัสดุเหลือใช้จึงต้องมีการประเมินถึงวิธีการได้มาซึ่งวัสดุท่อกระดาษ จัดหมวดหมู่ขนาดท่อที่หาได้ในท้องตลาดประเทศไทยและความคุ้มค่าในการเลือกใช้

2. ขั้นตอนการทดสอบวัสดุ หาคุณลักษณะต่างๆของท่อกระดาษเพื่อเป็นมาตรฐานในการออกแบบต่อไป

3. ขั้นตอนการออกแบบและทดลองก่อสร้าง พื้นอาคารซึ่งมีช่วงพาดไม่มากกว่า 5 เมตร แต่ไม่น้อยกว่า 2 เมตร โดยใช้โครงสร้างท่อกระดาษ

4. ขั้นตอนติดตามผลเพื่อหาประสิทธิภาพในการใช้งาน ความคงทน และ สรุปผลงานวิจัยต่อไป

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

1. สำรวจตลาดท่อกระดาษในประเทศไทย
2. เก็บข้อมูลของท่อกระดาษที่จะนำมาทดลอง
3. ออกแบบการทดลองเพื่อรับแรงของท่อกระดาษ
4. ทดลองการรับแรงของท่อกระดาษ
5. สรุปผลการรับแรงของท่อกระดาษ
6. ออกแบบการทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้น
7. ทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้น
8. สรุปผลการทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้น
9. อภิปลายผล
10. สรุปข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

หากมองในแง่ของการรักษาสิ่งแวดล้อมท่อกระดาษนั้นเหมาะแก่การรักษาสิ่งแวดล้อมมาตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตที่ใช้กระดาษเก่าซึ่งถูกนำมาใช้ใหม่ในการผลิต ทั้งด้วยความเป็นกระดาษทำให้ท่อกระดาษนั้นง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่มากกว่าวัสดุทั่วๆไปอยู่

เมื่อมองไปในอนาคต หากการพัฒนาวิธีการก่อสร้างโดยใช้ท่อกระดาษ ให้ทนต่อสภาพอากาศได้ดีกว่าในปัจจุบัน และ มีวิธีเพิ่มความแข็งแรงเพื่อให้ได้ช่วงพาดที่มากขึ้น เชื่อว่าระบบการก่อสร้างโดยใช้ท่อกระดาษจะสามารถเข้ามาอยู่ในกระแสหลักของวงการก่อสร้างได้ไม่ยาก

ด้วยเหตุนี้จึงเล็งเห็นว่าควรจะเริ่มศึกษาท่อกระดาษเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยอย่างจริงจัง

2.1.1 โครงสร้างท่อกระดาษ

ท่อกระดาษเป็นสิ่งที่หลงเหลือมาจากอุตสาหกรรมหลายชนิดจึงจัดว่าเป็นวัสดุเหลือใช้แต่โดยโครงสร้างแล้ว ท่อกระดาษนับว่ามีความแข็งแรงเป็นอย่างมากโดยเมื่อเปรียบเทียบต่อน้ำหนักแล้วจะมีความแข็งแรงยิ่งกว่าไม่ไผ่เสียอีก แต่โดยการวัดความแข็งแรงทั่วๆไปท่อกระดาษจะมีความแข็งแรงประมาณครึ่งหนึ่งของไม้ไผ่

ในทุกๆที่ในโลกแม้แต่ประเทศด้อยพัฒนาก็สามารถหาท่อกระดาษได้จากอุตสาหกรรมสิ่งทอ, อุตสาหกรรมกระดาษ หรืออะไรก็ตามที่ต้องการแกนม้วน ท่อกระดาษง่ายต่อการขนส่งและจัดการเพื่อก่อสร้าง สามารถใช้เลื่อยหั่นได้โดยไม่ต้องมีเครื่องมือมากมายในการประกอบ เพียงแต่ส่วนที่สำคัญที่สุดในการประกอบท่อกระดาษเป็นสถาปัตยกรรมจะอยู่ที่การออกแบบข้อต่อนั่นเอง

2.1.2 ประวัติของท่อกระดาษในงานสถาปัตยกรรม

1986 : ใน “Alvar Aaltos Exhibition” Shigeru Banได้นำท่อกระดาษไปใช้ในงานไปใช้ในงานสถาปัตยกรรม แต่เป็นเพื่อความสวยงามที่มีการใช้งานเท่านั้นยังไม่เป็นโครงสร้างอย่างเต็มรูปแบบ

1993 : Suikin Kat Arbor ซึ่งสร้างจาก ท่อกระดาษ 48 ต้น อันตั้งอยู่ในนาโกย่าในงาน Nagoya Design Exposition

1995 : ในเขต Hanshin Awaji ได้เกิดแผ่นดินไหวขึ้นและท่อกระดาษได้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างที่พักชั่วคราวให้กับผู้ประสบภัย โดยผู้ออกแบบก็คือ Shigeru Ban นั่นเอง

1999 : Shigeru Ban ได้ออกแบบโครงสร้างเต็นท์ขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อใช้เป็นที่พักผู้ประสบภัยใน Rwanda นับว่าเป็นโครงสร้างที่ถูกพัฒนาให้ง่ายทั้งต่อการขนย้ายและประกอบมากกว่าบ้านท่อกระดาษซึ่งออกแบบในปี 1995

2000 : Shigeru Ban ได้ออกแบบJapanese Pavilion ไว้ในงาน World Expo ที่ประเทศเยอรมัน นับเป็นการเปิดแนวคิดใหม่ของโครงสร้างกระดาษขนาดยักษ์และโครงสร้างกระดาษก็ถูกนับเป็นทางเลือกหนึ่งของงานก่อสร้างนับแต่นั้น

แม้โครงสร้างกระดาษจะถูกมองว่าเป็นโครงสร้างที่ไม่เหมาะจะใช้ในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมด้วยความที่ไม่ทนทานพอในระยะยาว แต่จากผลงานหลายๆผลงานก็ได้แสดงให้เห็นถึงการพยายามพัฒนาวิธีการต่างๆเพื่อใช้กับโครงสร้างท่อกระดาษ และในหลายผลงานก็ได้พิสูจน์ว่าโครงสร้างท่อกระดาษสามารถใช้ในสถานการณ์จริงได้เป็นอย่างดี

ในสถานการณ์ฉุกเฉินเมื่อมีการประสบภัย วัสดุก่อสร้างจะไม่สามารถหาได้ง่ายนัก ท่อกระดาษจึงเป็นตัวเลือกที่ Shigeru Ban ได้นำมาแก้ปัญหาและสร้างที่พักแก่ผู้ประสบภัยในโกเบ ต่อมาเมื่อ Shigeru Ban ได้เข้าไปในพื้นที่ของ Rwanda การออกแบบจึงพัฒนาให้ง่ายขึ้นและเบาขึ้นจากแบบของโกเบ

หากมองในแง่ของการรักษาสิ่งแวดล้อมท่อกระดาษนั้นมีเหมาะแก่การรักษาสิ่งแวดล้อมมาตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตที่ใช้กระดาษเก่าซึ่งถูกนำมาใช้ใหม่ในการผลิต ทั้งด้วยความเป็นกระดาษทำให้ท่อกระดาษนั้นง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ มากกว่าวัสดุทั่วๆไปอยู่

เมื่อมองไปในอนาคต หากการพัฒนาวิธีการก่อสร้างโดยใช้ท่อกระดาษ ให้ทนต่อสภาพอากาศได้ดีกว่าในปัจจุบัน และ มีวิธีเพิ่มความแข็งแรงเพื่อให้ได้ช่วงพาดที่มากขึ้น เชื่อว่าระบบการก่อสร้างโดยใช้ท่อกระดาษจะสามารถเข้ามาอยู่ในกระแสหลักของวงการก่อสร้างได้ไม่ยาก

จึงอยากให้หันมาลองใช้โครงสร้างจากท่อกระดาษเพื่อพัฒนาความคิดว่าจะใช้ท่อกระดาษอย่างไรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อาจจะเริ่มจากสิ่งง่ายๆก่อนเช่นป้อมยาม หรือบ้านพักชั่วคราวอย่างที่ Shigeru Ban ได้ทำก็เป็นได้ สุดท้ายเพื่อเกิดความชำนาญ ท่อกระดาษก็คงไม่ต่างอะไรกับวัสดุก่อสร้างที่วางขายในท่อตลาดพร้อมจะเป็นตัวเลือกสำหรับบุคคลทั่วไป

2.1.3 **ข้อดีของท่อกระดาษ**

-หาง่าย

หาได้ทั่วไปตามโรงงานสิ่งทอ, โรงงานกระดาษ, การขนส่งยาเม็ด หรือแม้แต่ในม้วนกระดาษชำระก็เป็นท่อกระดาษ

-น้ำหนักเบา

เมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่นๆในความแข็งแรงที่ใช้งานได้

-ทนทาน

เพราะเป็นวัสดุเหลือใช้จากระบบอุตสาหกรรมซึ่งมีมาตรฐานในการผลิตเพื่อใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพอยู่แล้วทั้งยังมีการเคลือบกันน้ำจึงหมดห่วงเรื่องสภาพความชื้นซึ่งมีผลต่อกระดาษได้

-รักษาสิ่งแวดล้อม

เพราะท่อกระดาษถูกผลิตมาจากกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่และด้วยความเป็นกระดาษทำให้สามารถนำท่อกระดาษกลับสู่การนำกลับมาใช้ได้ง่ายกว่าเศษวัสดุก่อสร้างอื่นๆ

-เป็นมิตรต่อผู้ใช้

พื้นผิวของกระดาษมีความสวยงามในตัวเองซึ่งหาไม่ได้ในโลหะหรือปูนที่หยาบกระด้าง

2.1.4 การผลิตท่อกระดาษ

ภาพที่ 2.1 เครื่องม้วนท่อกระดาษ

สามารถผลิตได้โดยง่ายเพียงนำแผ่นกระดาษที่ใช้แล้วมาเข้าเครื่องม้วนกระดาษ กระดาษจะถูกรีดผ่านชั้นกาวพร้อมกับการม้วนเพื่อให้ออกมาเป็นรูปทรงกระบอกซึ่งในขั้นตอนของการรีดผ่านชั้นกาวนี้เองที่ให้ท่อกระดาษสามารถทนความชื้นและมีความทนทานมากกว่า ซึ่งหากจะพัฒนาคุณลักษณะอื่นๆก็สามารถเพิ่มเติมสารต่างๆลงไปในขั้นตอนนี้ได้เช่นสารเพิ่มความทนไฟเป็นต้น

2.1.5 ประเภทของการใช้ท่อกระดาษ (Type of Paper Tube)

ในการวิจัยนี้แบ่งท่อกระดาษออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. **ท่อกระดาษที่ถูกใช้เป็นฉากกั้นไม่มีการรับน้ำหนัก** (Partition Type) มักถูกใช้เป็นฉากกั้น หรือส่วนประดับตกแต่งภายใน หรือใช้เป็นเฟอร์นิเจอร์

- Suikin Kat Arbor (Nagoya,1993)

2. **ท่อกระดาษที่ถูกใช้เป็นโครงสร้างแต่ไม่รับน้ำหนักสิ่งอื่น**(Shelter Type)

ท่อกระดาษที่รวมกันเป็นโครงสร้าง อาจเป็นในลักษณะเป็นกำบังหรือ โครงสร้างใดๆก็ตาม แต่มิได้รับน้ำหนักสิ่งอื่นนอกจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง ส่วนใหญ่ใช้สร้างเป็นกำบัง ศาลา หรือโครงสร้างอาคารชั้นเดียว

3. **ท่อกระดาษที่ถูกใช้เป็นโครงสร้างและรับน้ำหนักสิ่งอื่น**(Structure Type)

เป็นโครงสร้างท่อกระดาษที่ออกแบบมาเพื่อใช้แทนวัสดุโครงสร้างจริงๆ ปัจจุบันมักสร้างเป็นสะพานโค้ง ด้วยข้อจำกัดทางการออกแบบ มีทั้งที่เป็นระบบโครงถัก และคานโค้งรับแรง

2.2 Verb, Crisis: Twenty years of Emergency Architecture (20 **ปี กับสถาปัตยกรรมเพื่อการกู้ภัย**)

หนังสือเปิดเล่มมาด้วยการกล่าวถึงสถาปัตยกรรมที่ไม่น่าจะเป็นไปได้แห่งนครดูไบ ความฟุ้งเฟ้อ และท้าทายในการสร้างสถาปัตยกรรมล้ำสมัยภายใต้สภาพแวดล้อมสุดโต่งแบบทะเลทราย จนเข้ากลางเล่มจึงได้พูดถึงการใช้สถาปัตยกรรมแต่ที่เพียงพอต่อความจำเป็น การเลือกใช้วัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ก่อให้เกิดการเปรียบเทียบถึงตัวตนของสถาปัตยกรรมในปัจจุบันว่าเป็นเพียงแฟชั่นหรือเป็นปัจจัย หนังสือได้นำเสนอแนวคิดจากสถาปนิกหัวอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมหลายท่านและปิดเล่มลงด้วยสถาปัตยกรรมแบบที่ชุมชนแออัดมักจะเป็นคือหยิบจับสิ่งใดมาผสมก่อเป็นบ้านเรือนและอาคารได้ สุดท้ายสถาปนิกควรเป็นส่วนหนึ่งที่จะหยุดยั้งวิกฤติสิ่งแวดล้อม(Crisis of Environment) หรือไม่

ภาพที่ 2.2 สถาปนิกผู้ริเริ่มใช้ท่อกระดาษ ชิเกรุบัน

จากหนังสือ Crisis (หนังสือเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมเพื่อแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม) ชิเกรุบันได้อธิบายถึงจุดแรกเริ่มที่เขานำเอาท่อกระดาษมาใช้ ซึ่งอันที่จริงแล้วเขาไม่ได้มองถึงในแง่ของการส่งเสริมการรักษาสิ่งแวดล้อม แต่เพียงว่าในขณะเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่โกเบ ท่อกระดาษสามารถนำมาใช้ก่อสร้างได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดอื่นเท่านั้นเอง ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่นั้น การขนส่งวัสดุก่อสร้างไม่สร้างทำได้ ชิเกรุ บันจึงเสนอทางออกโดยการใช้วัสดุที่สามารถหาได้ในพื้นที่มาประกอบเข้าด้วยกัน โดยองค์ประกอบที่ ชิเกรุ บัน ใช้ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ที่ฮันชิน บริเวณตอนใต้ของ ประเทศญี่ปุ่น ก็คือ

1. ท่อกระดาษ ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรับน้ำหนัก
2. ลังเบียร์ ทำหน้าที่เป็นฐานราก
3. ผ้าใบพลาสติก ทำหน้าที่เป็นวัสดุปกคลุม

จนดูเหมือนเป็นสูตรสำเร็จกระทั่งเมื่อเหตุการณ์ผู้ลี้ภัยในประเทศรวันด้า ลังเบียร์ที่มักถูกใช้เป็นวัสดุทำฐานรากได้ถูกแทนที่ด้วยข้อต่อพลาสติกที่สามารถขันตึงได้ สูตรสำเร็จใหม่จึงเหมือนกลายเป็นลายเซ็นของ ชิเกรุ บัน ไปแทน นั่นก็คือ

1. ท่อกระดาษ โครงสร้างรับน้ำหนัก
2. ผ้าใบพลาสติก วัสดุปกคลุม
3. ข้อต่อพลาสติกซึ่งสามรถขันตึงได้ ทำหน้าที่ยึดโยงโครงสร้างท่อกระดาษให้แข็งเกร็ง

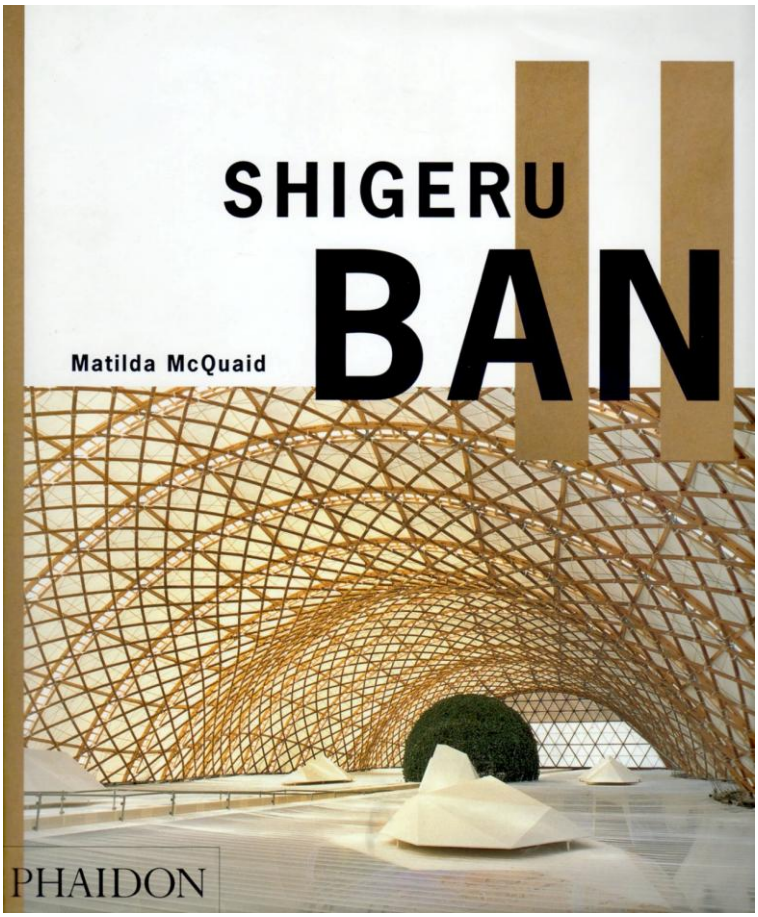
ชิเกรุ บัน ออกแบบชิ้นส่วนต่างๆให้ประกอบเข้าด้วยกันได้โดยไม่ต้องใช้กาว ไม่ต้องพึ่งผู้ชำนาญ ไม่ถาวร และเคลื่อนย้ายได้เบื้องหลังแนวคิดเหล่านี้ มาจากการที่แต่เดิมที ชิเกรุ บัน ยึดการออกแบบเพื่อสถานการณ์ฉุกเฉินเป็นสำคัญ ลักษณะการออกแบบจึงตั้งใจทำให้ง่ายและรวดเร็วพอที่จะสามารถนำไปประกอบเข้าในพื้นที่หลากหลายประเภทได้โดยง่ายผนวกกับแนวคิดของสังคมยุคเก่าของญี่ปุ่นที่ช่างก่อสร้างมีความสำคัญกว่านักออกแบบ สถาปัตยกรรมซึ่งออกมาจากขนบธรรมเนียม มีแบบแผนที่แน่ชัดจึงไม่สำคัญว่าใครจะเป็นผู้ก่อสร้างหรือใครจะเป็นผู้ซ่อม

ด้วยแนวคิดเหล่านี้แต่เดิม ทำให้บ้านแบบเก่าถูกสร้างขึ้นโดยใช้การร่วมแรงร่วมใจของคนในหมู่บ้าน และผู้อาศัยเองก็ต้องมีความสามารถพอที่จะจัดการซ่อมแซมหรือดูแลบ้านของตัวเองให้คงสภาพดีอยู่เสมอได้อย่างไม่ยากเย็นนัก เกิดเป็นความแตกต่างของความ “ยั่งยืน”ในอดีตกับปัจจุบันซึ่งส่งผลให้ความหมายของความ “ยั่งยืน”ในปัจจุบันเปลี่ยนแปลงไปเป็นสถาปัตยกรรมที่เกี่ยงข้องกับความแข็งแรงของวัสดุความคงทนถาวร แต่ความ “ยั่งยืน”ในแบบเก่าคือสถาปัตยกรรมที่สามารถซ่อมแซมดูแลได้โดยง่ายและทั่วถึง

หากจะมองหาสถาปัตยกรรมในแนวคิดความ “ยั่งยืน”แบบเดิมๆ ตัวอย่างที่ดีก็คือสถาปัตยกรรมอย่างง่ายๆในชุมชนแออัดทั้งหลายนั่นเอง สถาปัตยกรรมเหล่านั้นถูกสร้างขึ้นภายใต้โจทย์ที่มาจากสภาวะจำเป็นของผู้อยู่อาศัยนั้นก็คือ

1. **ประหยัด**หรือจะให้ดีคือใช้วัสดุที่หาได้มาโดยได้เปล่า
2. **ทำเองได้**เพื่อประหยัดค่าจ้างก่อสร้างและซ่อมแซม
3. **ใช้ประโยชน์ได้สูงสุด** เพราะชุมชนแออัดนั้นมีพื้นที่ต้องผู้อยู่อาศัยที่น้อยมากนั่นเอง ผู้อาศัยเองก็คือผู้ดูแลซ่อมแซม และก่อสร้างด้วยตัวเอง อาจจะมีการช่วยเหลือกันในชุมชนคล้ายการ “ลงแขก”เกี่ยวข้าว และวัสดุต่างๆที่เลือกนำมาใช้ก็ไม่ได้เกิดจากความต้องการรักษาสิ่งแวดล้อมแต่อย่างใด แต่เป็นเพราะต้องการประหยัดเพียงเท่านั้น ทั้งการออกแบบก็ต้องคำนึงถึงการใช้สอยร่วมกันเป็นสำคัญในพื้นที่ซึ่งมีจำกัดอีกด้วย

2.3 **ชิเกรุ บัน โดย** Matilda McQuaid



ภาพที่ 2.3 หนังสือ ชิเกรุ บัน

หนังสือเล่มนี้ได้เปิดเผยถึงที่มาและวิวัฒนาการทางสถาปัตยกรรมของ ชิเกรุ บัน เกี่ยวกับสถาปัตยกรรมที่สร้างจากท่อกระดาษ โดยแบ่งออกเป็นวิวัฒนาการในแง่ของ แรงบันดาลใจ การทดลอง ความสำเร็จและความผิดพลาด รวมถึงสิ่งที่ได้เรียนรู้ซึ่งเป็นข้อเท็จจริงทางกายภาพหนังสือเล่มนี้จึงมีส่วนช่วยอย่างมากในการใช้เป็นแหล่งอ้างอิงต่อการออกแบบการทดลอง และใช้ในการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆของท่อกระดาษในไทยและต่างชาติ หากจะแบ่งตามพัฒนาการทางการออกแบบเรียงตามปีที่เกิดผลงานจะสามารถแบ่งได้ดังนี้คือ

1.แรกเริ่มกับการใช้กระดาษในงานสถาปัตยกรรมของ ชิเกรุ บัน

2.ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านการรับน้ำหนักของโครงสร้างจากกระดาษ

3.ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านข้อต่อของโครงสร้างจากกระดาษ

4.ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านการถ่ายน้ำหนักระหว่างโครงสร้างจากกระดาษ

5.ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านโครงสร้างหลังคาแบบ Waffle Concrete Slab ซึ่งสร้างจากกระดาษแบบ Honey Comb

6.ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านโครงสร้างจากกระดาษแบบ 3 มิติ

2.3.1 แรกเริ่มกับการใช้กระดาษในงานสถาปัตยกรรมของ ชิเกรุ บัน

ชิเกรุ บัน เริ่มต้นสนใจในท่อกระดาษจากหัวข้อเหล่านี้ อาจจะด้วยว่าเพราะเป็นชาวญี่ปุ่นที่คุ้นเคยกับการใช้กระดาษในงานสถาปัตยกรรมอยู่แล้ว แต่มากกว่านั้น พอจะสรุปออกมาเป็นข้อๆได้ดังนี้

1. ไม่แพง

2. จัดการ (เปลี่ยนชิ้นส่วน) ได้ง่าย

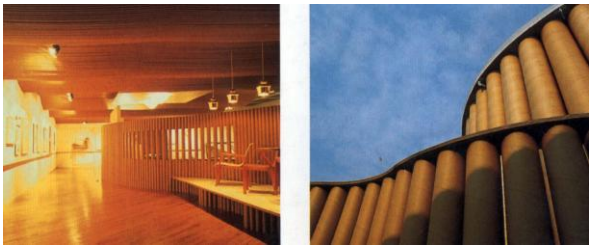
3. ใช้เทคโนโลยีอย่างง่าย

4. เป็นธรรมชาติ (สีสัน, พื้นผิว)

5. ไร้ขยะ (ง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่)

ในการนี้ ชิเกรุ บัน ได้กล่าวว่ากระดาษคือไม้ที่พัฒนาแล้ว (Evolved Wood) เพราะว่า ไม้กับกระดาษนั้นมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน แต่กระดาษสามารถนำมาเวียนใช้ใหม่ได้อย่างไม่รู้จบ ทั้งยังสามารถเพิ่มเติมคุณสมบัติต่างๆได้อีก เช่นเพิ่มเติมสารเคมีให้สามารถทนแดดทนฝนได้มากกว่าเดิม เป็นต้น

ชิเกรุ บัน เริ่มต้นใช้โครงสร้างจากท่อกระดาษในปี 1986 เพื่อการจัดแสดงผลงาน Alvar Aalto Exhibition ต่อมาในปี 1989 ชิเกรุ บัน จึงได้ใช้โครงสร้างกระดาษกับผลงานที่ใหญ่ขึ้นใน Paper Arbor PTS-01 ในงาน World Expo ที่เมืองนาโกย่า ประเทศญี่ปุ่น



ภาพที่ 2.4 ผลงานท่อกระดาษ Alvar Aulto Exhitbition และ Paper Arbor PTS-01 ในงาน World Expo ที่เมืองนาโกย่า ประเทศญี่ปุ่น

แต่ทั้งสองผลงานนี้ก็เป็นเพียงสถาปัตยกรรมแบบที่ใช้เพื่อการจัดแสดง ท่อกระดาษนั้นยังไม่ได้แสดงศักยภาพออกมามากไปกว่าเป็นวัสดุตกแต่งเพียงเท่านั้น

2.3.2 ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านการรับน้ำหนักของโครงสร้างจากกระดาษมี ดังนี้

1. Library of Poet 2 ปี หลังจาก Paper Arbor ชิเกรุ บัน ก็ได้รับการติดต่อให้ออกแบบอาคาร ซึ่งเป็นอาคาร Private แห่งแรกที่เจาะจงใช้โครงสร้างซึ่งทำจากวัสดุท่อกระดาษ ซึ่งก็คือห้องสมุด Library of Poet นั่นเอง เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อกระดาษมีขนาด 10 เซนติเมตร หนา 12.5 เซนติเมตร ถูกนำมาใช้ร่วมกับโครงสร้างแบบ Post Tension คือโครงสร้างจากท่อกระดาษแล้วยึดเข้าด้วยกัน โดยใช้การขันเหล็กเส้นให้ข้อต่อไม้บีบเข้าหากันนั่นเอง สิ่งที่ศึกษาได้จากผลงานเพื่อให้ผ่านข้อกฎหมายจึงมีการทดสอบการรับน้ำหนักในระยะยาวของท่อกระดาษ (The Long Term effect of creep of the paper tubes under a constant axial load)

ภาพที่ 2.5 ผลงานท่อกระดาษ Library of Poet

1.1 พัฒนาการของวิธีการก่อสร้างโครงสร้างกระดาษ

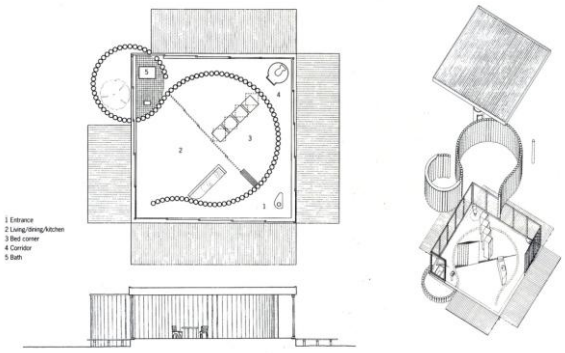
- มีการคิดระบบข้อต่อสำหรับโครงสร้างท่อกระดาษโดยใช้สลิงในการขันตึงโครงสร้างเข้าด้วยกัน

1.2 สิ่งที่ได้เรียนรู้

- ท่อกระดาษจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอันเป็นผลมาจากความชื้นเป็นตัวแปรสำคัญ

2. Paper House หลังจากความสำเร็จจาก Library of Poet โปรเจคต์ต่อมาคือ Paper House บ้านพักตากอากาศ ริมทะเลสาบข้างภูเขาไฟฟูจิ

สิ่งที่ท้าทายมากยิ่งขึ้นก็คือ การที่ ชิเกรุ บัน ได้ใช้ท่อกระดาษเป็นโครงสร้างรับน้ำหนักทั้งด้วยลักษณะการวางกำแพงท่อกระดาษเป็นรูปตัว S ทำให้ผนังทั้งหมดทำหน้าที่เป็นผนังรับน้ำหนักนับได้ว่าเป็นครั้งแรกที่ทั้งอาคารถูกรับน้ำหนักไว้ด้วยกระดาษเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างและภาพลายเส้นของท่อกระดาษ Paper House

2.1 พัฒนาการของวิธีการก่อสร้างโครงสร้างกระดาษ

- สามารถใช้ท่อกระดาษเป็นวัสดุในการรับน้ำหนักหลังคาทั้งชุดได้โดยใช้ระบบกำแพงรับน้ำหนัก

2.2 สิ่งที่ได้เรียนรู้

- การยุบตัวของท่อกระดาษอันเนื่องมาจากแรงกด จะมีผลเกิดขึ้นจำกัดอยู่ที่ส่วนครึ่งบนของช่วงพาดเท่านั้น

2.3.3.ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านข้อต่อของโครงสร้างจากกระดาษ

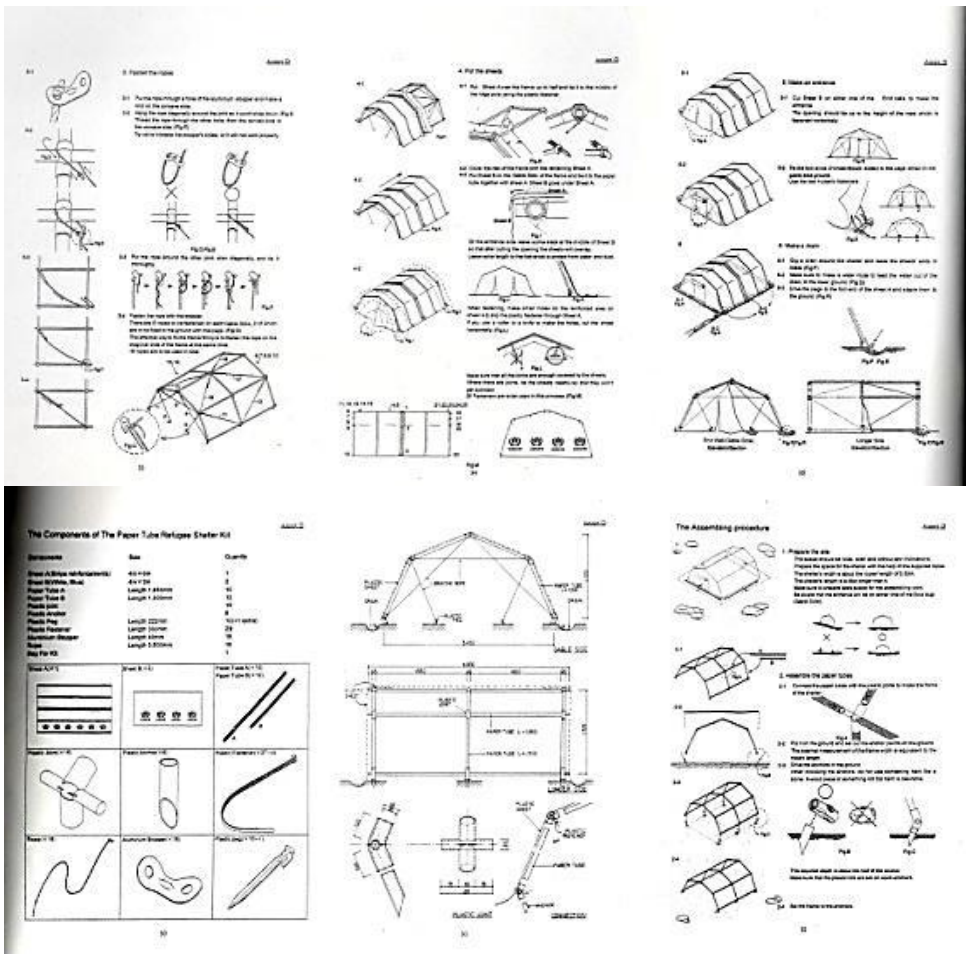
หลังจากที่โปรเจคต์ประเภทที่อยู่อาศัย ของ ชิเกรุ บัน ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีในแง่ของ ความถาวรของสถาปัตยกรรมจากกระดาษ ขั้นต่อมาของการพัฒนาจึงเป็นในแง่ของขั้นตอนการก่อสร้าง ที่ต้องทำให้ง่ายขึ้น ถูกลง และเป็นไปได้ในทุกๆสถานการณ์ ชิเกรุ บัน เลือกที่จะท้าทายโดยใช้โจทย์ในการ สร้าง พื้นที่สำหรับลี้ภัยซึ่งสร้างได้ง่าย รวดเร็ว ไม่ซับซ้อน ในหลายต่อหลายเหตุการณ์ ทำให้เกิดความเข้าใจ ยิ่งขึ้นถึงข้อต่อการออกแบบและคุณลักษณะพิเศษของกระดาษมากกว่าเดิม ซึ่งจะเห็นจากผลงาน ดังต่อไปนี้

1. Paper Emergency Shelter for UNHCR

ชิเกรุบัน และ United Nation Commissioner for Refugee ได้ร่วมมือสร้างที่ลี้ภัยชั่วคราวให้กับ ผู้ลี้ภัยชาวรวันดา จากเหตุการณ์ ฆ่าล้างเผ่าพันธ์ในประเทศแทนซาเนียและซีรี เป็นประเทศที่อยู่บนชายฝั่งตะวันออกของแอฟริกา

ภาพที่ 2.7 การประกอบที่พักผู้ลี้ภัยของชาวรวันดาจากท่อกระดาษ (1)

ภาพที่ 2.8 การประกอบที่พักผู้ลี้ภัยของชาวรวันดาจากท่อกระดาษ (2)



ภาพที่ 2.9 อธิบายชิ้นส่วนและการประกอบที่พักผู้ลี้ภัยของชาวรวันดาจากท่อกระดาษ

เพื่อที่จะสร้างที่ลี้ภัยชั่วคราวขนาดหนึ่งครอบครัวต่อหลัง (4x6 เมตร) โดยให้ผู้ลี้ภัยเองสามารถที่จะ ประกอบใช้ได้เอง การออกแบบจึงต้องง่าย ไม่ซับซ้อน โดยโครงสร้างทั้งหมดจะใช้ท่อกระดาษเป็นหลัก และมีข้อต่อเป็นข้อต่อพลาสติกซึ่งใช้รูปแบบซ้ำๆกันเพื่อให้ง่ายต่อการผลิตในปริมาณมาก ทั้งท่อกระดาษนั้นก็ถูกยกฐานการผลิตเข้าไปผลิตในพื้นที่เพื่อลดต้นทุน และใช้ผ้าใบอันเป็นเศษเหลือ จากรถขนส่งซึ่งได้รับบริจาคมา การประกอบใช้เพียงสายรัดและเชือกขึงตึงก็สามารถสร้างได้แล้ว

1.1 พัฒนาการของวิธีการก่อสร้างโครงสร้างกระดาษ

- ใช้การออกแบบข้อต่อที่สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายรูปแบบโดยผลิตซ้ำๆ

1.2 สิ่งที่ได้เรียนรู้

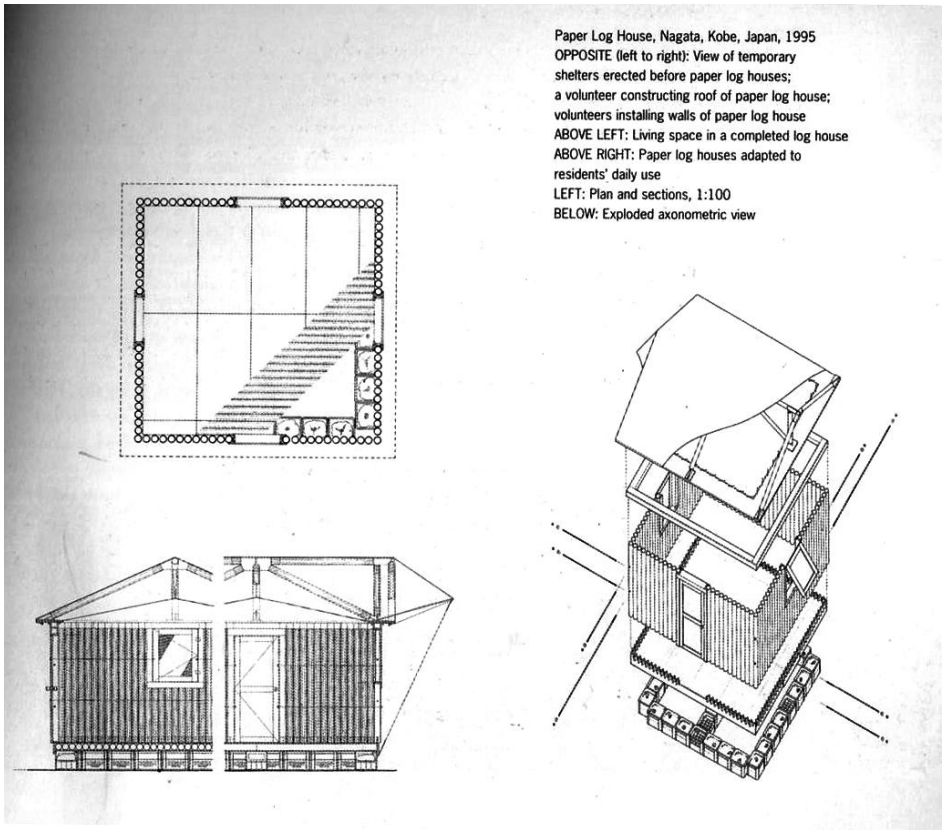
- ข้อดีของการใช้ท่อกระดาษเป็นวัสดุหลักคือสามารถนำฐานการผลิตไปตั้งในพื้นที่ได้ทันที

2. Paper Log Houses รูปแบบเล็กน้อยตามแต่สถานการณ์ที่พบในพื้นที่

เริ่มต้นที่เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ฮันชิน โกเบ ประเทศญี่ปุ่น จึงได้เกิดโครงการสร้างที่พักชั่วคราวให้กับผู้ประสบภัยได้ใช้อาศัยอยู่ จากลังขวดเบียร์ที่รับบริจาคมาโดยถ่วงไว้ด้วยกระสอบทราย กำแพงสร้างขึ้นจากท่อกระดาษเส้นผ่านศูนย์กลาง 106 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร แล้วจึงขึงหลังคาด้วยผ้าใบ และเว้นที่ว่างระหว่างที่พักแต่ละหลังไว้ 1.8 เมตร เพื่อใช้เป็นพื้นที่สาธารณะสำหรับฉนวนกันน้ำและความหนาวได้ใช้วิธีปิดเทปฟองน้ำไว้ระหว่างท่อกระดาษแต่ละท่อ โดยเมื่อแล้วเสร็จที่พักแต่ละหลังจะมีขนาด 52 ตารางเมตร ในงบประมาณที่ต่ำกว่า 2000 เหรียญสหรัฐ หรือ 60,000 บาท และที่พักแต่ละหลังยังง่ายต่อการรื้อถอนและน้าไปกลับมาใช้ใหม่อีกด้วย

ภาพที่ 2.10 ผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศญี่ปุ่น

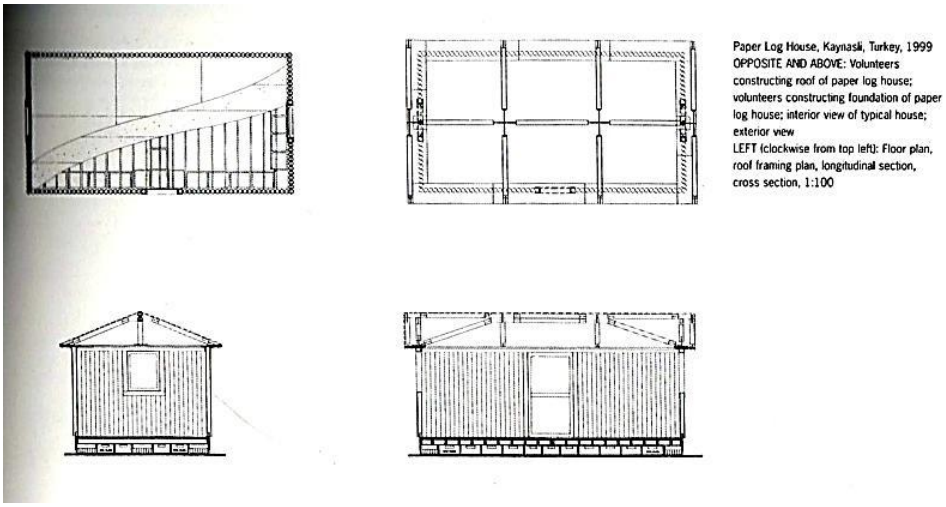
ภาพที่ 2.11 การประกอบท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศญี่ปุ่น



ภาพที่ 2.12 ภาพลายเส้นของผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศญี่ปุ่น

ในประเทศตุรกี สร้างโดยยึดแบบจากที่ญี่ปุ่นแต่ปรับปรุงเพื่อให้เข้ากับบริบทในประเทศตุรกี โดยใช้ขนาด 3x6 เมตร ซึ่งใหญ่ขึ้นเพราะเป็นขนาดมาตรฐานของไม้อัดในประเทศตุรกี และด้วยขนาดของคนตุรกีที่ใหญ่กว่าคนญี่ปุ่นด้วย อีกอย่างที่เปลี่ยนไปคือมีการเปลี่ยนฉนวนมาเป็นการใช้เศษกระดาษสอดไว้ตามร่องของท่อกระดาษแทน และใช้เพดานทำจากใยกระจกพลาสติก หรือกระดาษลัง เพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนให้กับที่พัก

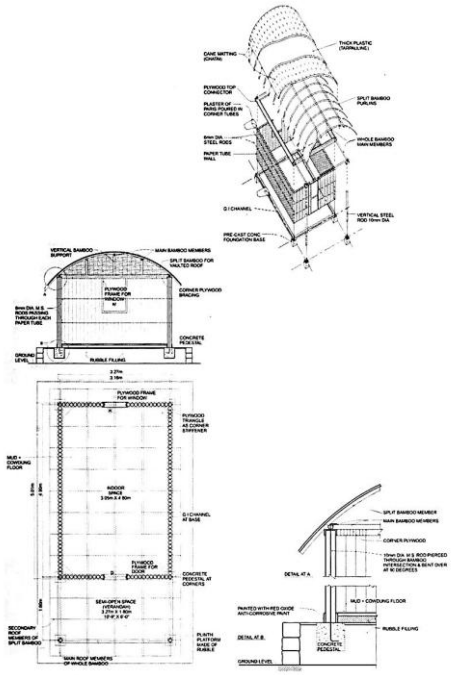
ภาพที่ 2.13 ผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศตุรกี



ภาพที่ 2.14 ภาพลายเส้นผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศตุรกี

ในประเทศอินเดีย บ้านท่อนซุงมีลักษณะที่ต่างออกไปอย่างเห็นได้ชัดทั้งฐานรากและหลังคา ยางที่เป็นซากของอาคารซึ่งได้พังไปแล้วได้ถูกนำมาฐานรากแทนลังเบียร์ซึ่งไม่สามารถหาได้ แล้วจึงนำโคลนมาพอกอย่างบ้านท้องถิ่นสำหรับหลังคาได้ใช้ไม้รวกจากไม้ไผ่มาสานเป็นเป็นโครงและใช้ไม้ไผ่เป็นคานโดยการสานแบบท้องถิ่นแล้วจึงคลุมไปด้วยพลาสติกใส จากนั้นจึงเอาเสื่อปูทับการระบายอากาศผ่านหน้าจั่วก่อให้เกิดผลดีต่อการไหลเวียนอากาศภายในที่พักซึ่งมีการทำครัวภายในที่พักเลยทีเดียวส่วนหนึ่งการประกอบอาหารภายในที่พักก่อให้เกิดผลดีในการป้องกันยุงเข้าไปภายในที่พักได้อีกทาง

ภาพที่ 2.15 ผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศอินเดีย



ภาพที่ 2.16 ภาพลายเส้นผลงานท่อกระดาษ Paper Log Houses ในประเทศอินเดีย

2.1 พัฒนาการของวิธีการก่อสร้างโครงสร้างกระดาษ

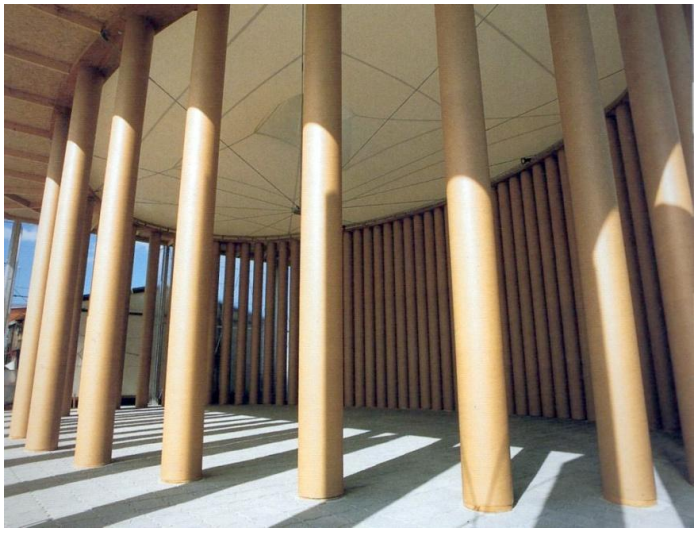
- ด้วยข้อจำกัดในด้านวัสดุทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบบ้างตามแต่สถานการณ์ โดยยึดเอาพฤติกรรมของผู้ใช้เป็นหลัก

- มีการใช้ฐานรากที่แตกต่างกันทั้งลังเบียร์ หรือดินอัด เพื่อให้ระบบโครงสร้างมีความทนทานมากยิ่งขึ้น

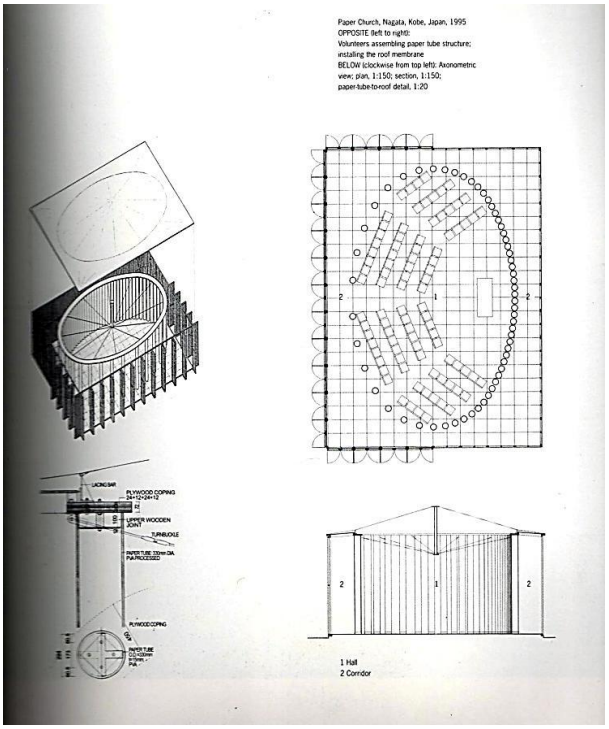
2.3.4 ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านการถ่ายน้ำหนักระหว่างโครงสร้างจากกระดาษ แสดงดังผลงานดังต่อไปนี้

1. Paper Church

ศูนย์ชุมชนซึ่งสร้างเป็นโบสถ์ของผู้ประสบภัยในเมืองโกเบจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี 1995 วัสดุต่างๆได้รับบริจาคมาจากบริษัทต่างๆ และถูกสร้างภายใน 5 อาทิตย์ จากอาสาสมัคร 160 คน โดยมีพื้นที่ 10x15 เมตร ล้อมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตและใช้เสากระดาษจำนวน 58 ต้นเป็นโครงสร้างหลักหลักการออกแบบได้ใช้ลักษณะของวงแหวนรับน้ำหนักแต่แผ่ออกไปทางสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามการใช้ ปัจจุบันได้ถูกรื้อถอนออกไปแล้ว



ภาพที่ 2.17 ผลงานท่อกระดาษ Paper Church



ภาพที่ 2.18 ภาพลายเส้นผลงานท่อกระดาษ Paper Church

1.1 พัฒนาการของวิธีการก่อสร้างโครงสร้างกระดาษ

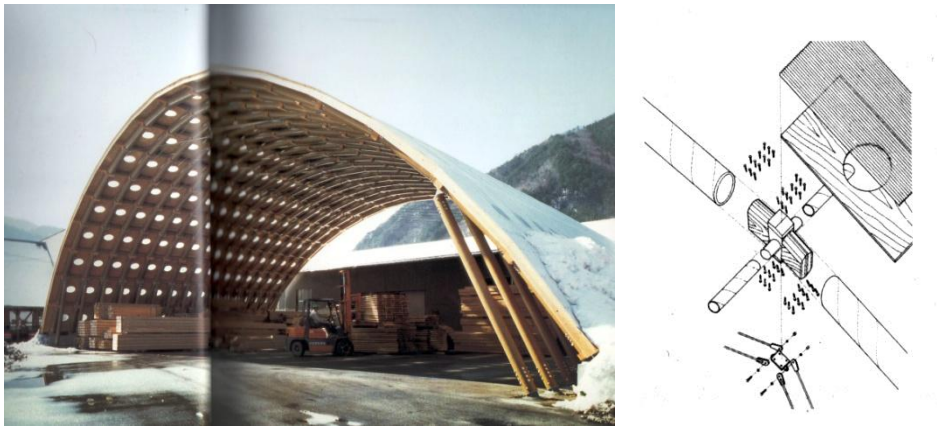
- ระบบวงแหวนถ่ายน้ำหนักที่มักจะใช้กับยอดโดมถูกนำมาใช้ในการออกแบบร่วมกับโครงสร้างแบบโครงร่วมเพื่อให้สามารถรองรับหลังคาที่ช่วงพาดถึง 15 เมตร ได้นั่นเอง

1.2 สิ่งที่ได้เรียนรู้

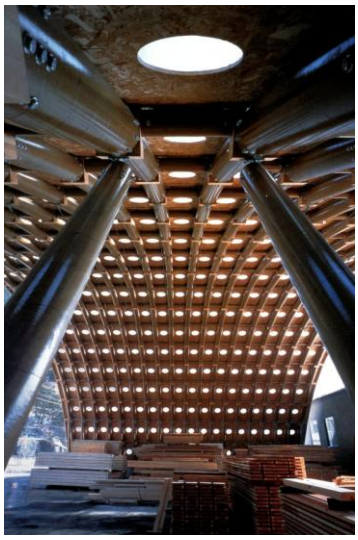
- ความสูงและความกว้างทำให้เกิดการล้มพับลงของโครงสร้างได้ง่าย ฐานรากที่มั่นคงจึงเป็นสิ่งจำเป็นของผลงานนี้อย่างมาก

2 .Paper Dome

ด้วยขนาดถึง 28x2.5 เมตร โครงสร้างจากท่อกระดาษที่สามารถรองรับน้ำหนักของหิมะได้ จึงถูกออกแบบให้เป็นรูปตัวยูคว่ำแบบพาราโบลา ท่อกระดาษทั้งหมดถูกต่อเข้าด้วยกันตามแนวแกนด้วยข้อต่อไม้และค่อยๆหักมุมจนโค้งไปจากปลายสู่ปลาย



ภาพที่ 2.19 ผลงานท่อกระดาษ Paper Dome และภาพลายเส้นแสดงรายละเอียดของชุดข้อต่อ



ภาพที่ 2.20 โครงสร้างภายในของ Paper Dome

2.1 พัฒนาการของวิธีการก่อสร้างโครงสร้างกระดาษ

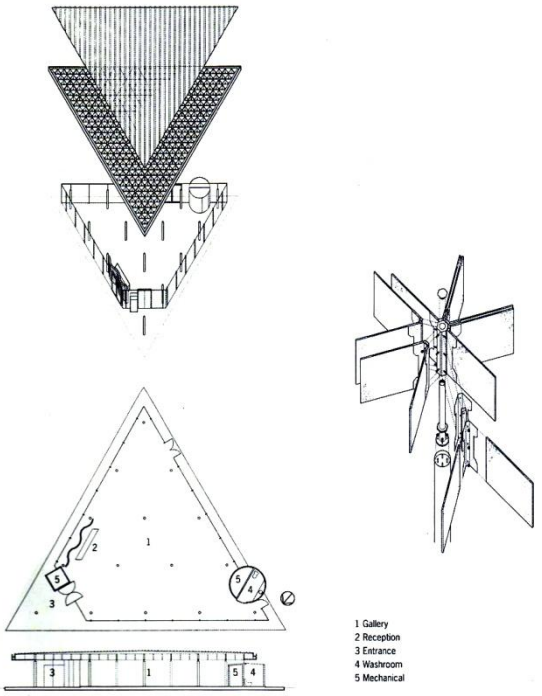
- ใช้การทา epoxy เพื่อป้องกันความชื้นบริเวณผิวหน้าของรอยตัดของท่อกระดาษมีการใช้ประกับเสริมในโครงสร้างเพื่อป้องกันการเสียรูปของท่อกระดาษและสามารถทำช่วงพาดได้ยาวมากกว่าเดิม

2.2 สิ่งที่ได้เรียนรู้

- แรงดัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างรูปครึ่งวงกลมจะมากกว่าแรงอัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเดียวกันถึง 1.53 เท่า

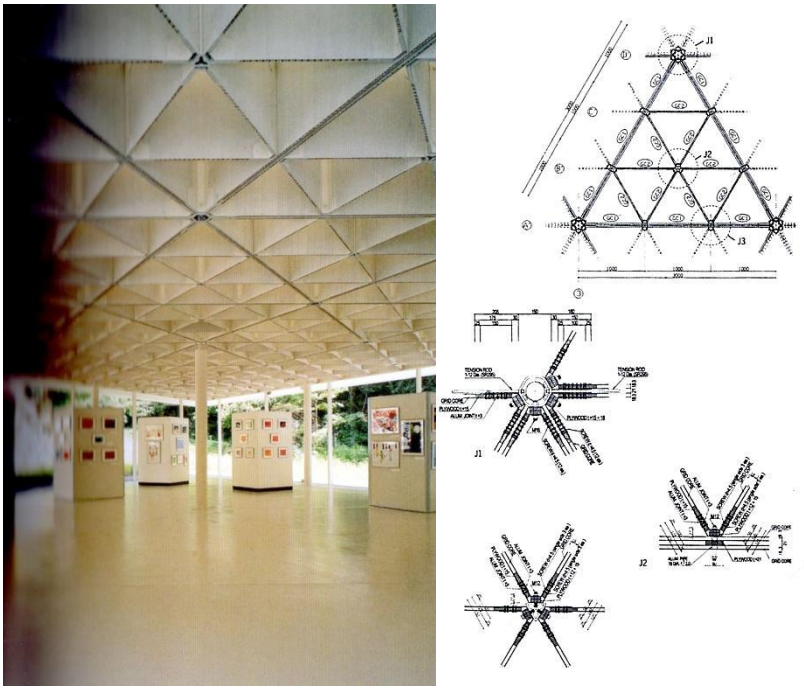
- ความทนทานต่อแรงกดและความยืดหยุ่นของวัสดุท่อกระดาษแปรผกผันกับปริมาณความชื้นในวัสดุ

2.3.5 ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านโครงสร้างหลังคาแบบ Waffle Concrete Slab ซึ่งสร้างจากกระดาษแบบ Honey Comp



ภาพที่ 2.21 ภาพลายเส้นของโครงสร้างหลังคาแบบ Waffle Concrete Slab

1. Nemunoki Children's Art Museum เป็นอาคารเปิดโล่งที่ใช้โครงสร้างหลังคาแบบ Waffle Concrete Slab 3 ทิศทางเพื่อแสดงผลงานศิลปะโดยมีช่วงเสาห่างกันถึง 3 เมตร ความจริงคือ การใช้คุณสมบัติความแข็งแรงของหน้าตัดของกระดาษในการประยุกต์เพื่อใช้เป็นคานรับน้ำหนักของหลังคา



ภาพที่ 2.22 ภาพจริงและภาพลายเส้นของ Nemunoki Children's Art Museum

1.1 พัฒนาการของวิธีการก่อสร้างโครงสร้างกระดาษ

- มีการใช้คุณลักษณะความแข็งแรงในแนวตั้งของกระดาษลังอย่างคุ้มค่า

1.2 สิ่งที่ได้เรียนรู้

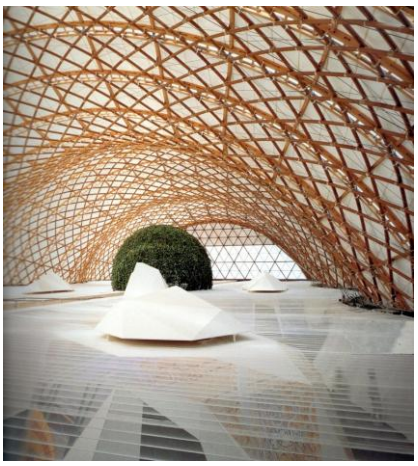
- ส่วนที่ยากที่สุดคือการเข้าข้อต่อซึ่งต้องใช้ประกับหนีบกระดาษลังเข้าด้วยกัน โดยต้องเฉลี่ยแรงอย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.6 ผลงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านโครงสร้างจากกระดาษแบบ 3 มิติ แสดงผลงานได้ดังต่อไปนี้

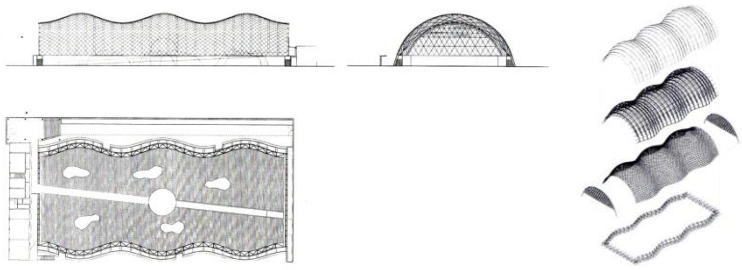
1. Japan Pavilion, Expo 2000 เมืองฮันโนเวอร์ ประเทศเยอรมัน

หากไม่นับปัญหาในความล่าช้าเนื่องจากการหาวัสดุหลังคาผ้าใบที่ได้มาตรฐานการทนไฟแล้ว นับว่าผลงาน Japan Pavilion หลังนี้เป็นก้าวกระโดดของการใช้โครงสร้าง ท่อกระดาษในการสร้างอาคารขนาดใหญ่เป้าหมายในการออกแบบมีเพื่อแสดงถึงพลังของวัสดุซึ่งถูกนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งก็คือท่อกระดาษนั้นเอง การสร้างโดมกระดาษนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่มากจึงเลือกโครงสร้างเป็นกระบอกครึ่งวงกลมสร้างขึ้นจากท่อสานกันเป็นสองชั้น โดยชั้นที่ 1 ตึกจะสานในแนวทแยงและชั้นที่สองจะสานในแนวตรง ปิดทับด้วยผ้าใบขึงตึง การที่โครงสร้างเป็นแบบครึ่งวงกลมจะทำให้มีความแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักโครงสร้างโดยรวมและถ่ายลงสู่พื้นได้อย่างดี ทั้งยังใช้สลิงขึงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างอีกด้วย

โครงสร้างข้อต่อถูกทำอย่างง่ายๆโดยใช้พุกเชื่อมต่อท่อเข้าด้วยกันตามแนวยาวโดยสอดเข้าไปตามหัวท้าย และใช้เส้นพลาสติกรัดโครงสร้างเพื่อสานกันแบบ lamaella พียงเท่านั้น เป็นการใช้ภูมิปัญญาท้องถิ่นอย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2.23 Japan Pavilion Expo 2000 เมืองฮันโนเวอร์ ประเทศเยอรมัน



ภาพที่ 2.24 ภาพลายเส้นของ Japan Pavilion Expo 2000 เมืองฮันโนเวอร์ ประเทศเยอรมัน

ภาพที่ 2.25 การก่อสร้างโครงสร้างของ Japan Pavilion Expo 2000 เมืองฮันโนเวอร์ ประเทศเยอรมัน

1.1 พัฒนาการของวิธีการก่อสร้างโครงสร้างกระดาษ

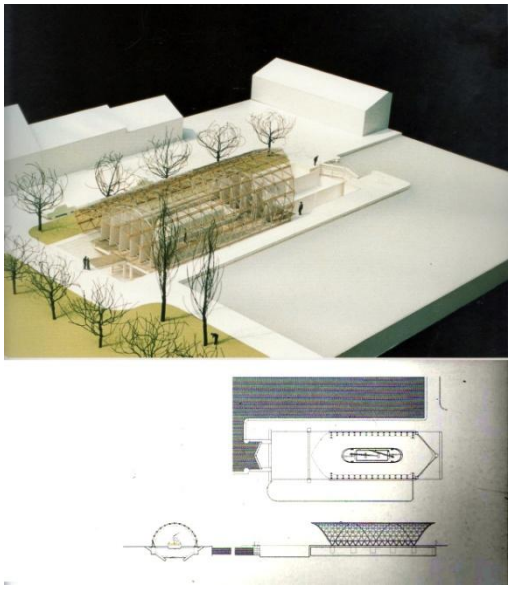
- ใช้การผสมผสานเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ากับงานช่างแบบดั่งเดิมเช่นการผูกเงื่อนท่อกระดาษเพื่อยึดโครงสร้าง

1.2 สิ่งที่ได้เรียนรู้

- การใช้โครงสร้างท่อกระดาษสองชั้นที่มีแกนขัดกันเพื่อให้โครงสร้างอยู่ตัวได้ดีขึ้น

2. Boathouse, centre d'interpretation du canal de bourgogne

อู่จอดเรือเพื่อใช้จัดแสดงขนาด 11 เมตร พัฒนาขึ้นจากโครงสร้างของ Japan Pavilion คือเรียบง่ายขึ้นและไม่ต้องมีการซ้อนโครงสร้างเช่นเดิม



ภาพที่ 2.26 โครงสร้างและภาพลายเส้นของอู่จอดเรือที่พัฒนาจากโครงสร้างของ Japan Pavilion

2.1 พัฒนาการของวิธีการก่อสร้างโครงสร้างกระดาษ

- ต่อยอดจาก Japan Pavilion โดยพัฒนาเพิ่มเติมในระบบข้อต่อซึ่งเป็นประกับทำให้ไม่จำเป็นต้องทำโครงสร้างท่อกระดาษถึงสองชั้น

2.2 สิ่งที่ได้เรียนรู้

- การใช้วัสดุผสมผสานในบริเวณที่เป็นจุดด้อยของระบบท่อกระดาษ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิยะพงษ์ ปันทนา (2553) ได้ศึกษาเรื่องการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของท่อกระดาษผนังบาง ภายใต้ภาระกดในแนวแกน โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลของรั ศมี ความสูง ชนิดน้ำหนักกระดาษ และทิศทางกดตามแนวขนานและขวางเครื่องของท่อกระดาษ ต่อการยุบตัวในแนวแกน และความสามารถในการรับภาระสูงสุดในแนวแกนของท่อผนังบางที่ท้าจากท่อกระดาษภายใต้ภาระแบบ Quasi-Static การศึกษานี ศึกษาจากการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของกระดาษทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การทดลองกดท่อกระดาษผนังบางจริง การคำนวณผลทางทฤษฎี และการวิเคราะห์ด้ วยแบบจ้าลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการทดสอบมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังนี รัศมี3 ค่า ได้แก่ 25 35 และ 50 มิลลิเมตร ความสูงของท่อผนังบาง 3 ค่า ได้แก่ 100 200 และ 300 มิลลิเมตร ชนิดน้ำหนัก กระดาษ 3 ชนิด ได้แก่ 125 185 และ 230 แกรม และกระดาษจะถูกม้วนในสองทิศทาง คือ ทิศทางขนานและทิศทางขวางเครื่องของท่อกระดาษ จากการศึกษาพบว่าระยะยุบตัวในแนวแกนจะมีค่าที่ลดลงเมื่อตัวแปรรัศมีมีค่าเพิ่มขึ้น หรือความสูงมีค่าลดลง หรือชนิดน้ำหนักกระดาษมีค่าที่สูงขึ้น และผลภาระกดสูงสุดในแนวแกนจะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อชนิดน้ำหนักกระดาษสูงขึ้น แต่ผลที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อตัวแปรรัศมี และความสูงของท่อกระดาษมีค่าเปลี่ยนไป

ซึ่งการทดลองนี้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบคุณสมบัติของท่อกระดาษ ทั้งนี้ในการทดสอบจะถูกเพิ่มการทดสอบการรับแรงดัดและการรับแรงดึงเข้าไปเพิ่มเพื่อให้การ คำนวณเพื่อนำไปใช้งานมีความเที่ยงตรงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น

การทดสอบการรับแรงของท่อกระดาษในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทางการรับแรงของท่อกระดาษมีปัจจัยหลักคือชนิดของกระดาษและวิธีการม้วนมากกว่าขนาดและความยาว

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

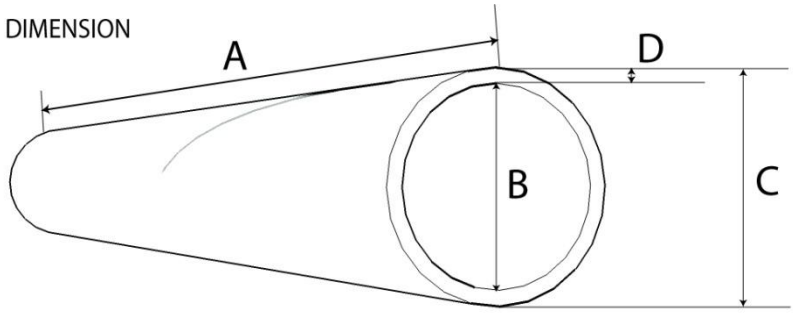
การวิจัยการก่อสร้างโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษ มีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

1. สำรวจตลาดท่อกระดาษในประเทศไทย
2. เก็บข้อมูลของท่อกระดาษที่จะนำมาทดลอง
3. ออกแบบการทดลองเพื่อรับแรงของท่อกระดาษ
4. ทดลองการรับแรงของท่อกระดาษ
5. สรุปผลการรับแรงของท่อกระดาษ
6. ออกแบบการทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้น
7. ทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้น
8. สรุปผลการทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้น
9. อภิปลายผล
10. สรุปข้อเสนอแนะ

3.1 การสำรวจตลาดท่อกระดาษในประเทศไทย

3.1.1 ท่อกระดาษจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

ท่อกระดาษที่เหลือใช้ในไทยก็เหมือนกับประเทศอื่นคือมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ จากการลงพื้นที่ในบริเวณเขตอุสาหกรรม(บางมด, สุขสวัสดิ์) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 3.1 แบบแสดงสัดส่วนต่างๆเพื่อใช้กับตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบท่อกระดาษใช้แล้วในท้องตลาดกรุงเทพฯ

ลักษณะท่อ	ที่มา	ขนาด	น้ำหนัก	ภาพ
No.01 ท่อแกนผ้าใหญ่	แกนกระดาษม้วนผ้าจากโรงงานทอผ้า	A: 180.35 cm. B: 5.45 cm. C: 6.35 cm. D: 0.45 cm.	838 g.	
No.02 ท่อแกนผ้าเล็ก	แกนกระดาษม้วนผ้าจากโรงงานทอผ้า	A: 110.64 cm. B: 3.20 cm. C: 3.35 cm. D: 0.15 cm.	139 g.	
No.03 ท่อแกนพลาสติกใส (Wrap)	อุตสาหกรรมก่อสร้าง	A: 140.5 cm. B: 5.6 cm. C: 6.3 cm. D: 0.35 cm.	605 g.	
No.04 ท่อแกนสติ๊กเกอร์ PVC	ธุรกิจสิ่งพิมพ์	A: 139 cm. B: 7.7 cm. C: 8.6 cm. D: 0.45 cm.	1172 g.	

ท่อกระดาษมักจะมาจากโรงงานผ้าเป็นส่วนใหญ่โดยมีร้านขายของเก่าไปขอซื้อในราคา 2บาท/1กิโลกรัม แล้วจึงจะมาขายเป็นเศษกระดาษต่อให้โรงโม่ในราคา 3บาท/1กิโลกรัม เพื่อนำไปกลับเข้าสู่ขั้นตอนรีไซเคิลอีกครั้ง

ตารางที่ 3.2 ราคาซื้อ/ขาย ท่อกระดาษใช้แล้วในท้องตลาดกรุงเทพฯ

ประเภทท่อ	ราคาซื้อจากโรงงาน 2 บาท/กิโลกรัม	ราคาขายจากร้านของเก่า 3 บาท/กิโลกรัม
No.01 ท่อแกนผ้าใหญ่	838 g. = 1.676 บาท/ต้น	838 g. = 2.514 บาท/ต้น
No.02 ท่อแกนผ้าเล็ก	139 g. = 0.278 บาท/ต้น	139 g. = 0.417 บาท/ต้น
No.03 ท่อแกนพลาสติกใส (Wrap)	605 g. = 1.21 บาท/ต้น	605 g. = 1.815 บาท/ต้น

ตารางที่ 3.2 ราคาซื้อ/ขาย ท่อกระดาษใช้แล้วในท้องตลาดกรุงเทพฯ

ประเภทท่อ	ราคาซื้อจากโรงงาน 2 บาท/กิโลกรัม	ราคาขายจากร้านของเก่า 3 บาท/กิโลกรัม
No.04 ท่อแกนสติ๊กเกอร์PVC	1172 g. = 2.344 บาท/ต้น	1172 g. = 3.516 บาท/ต้น

*จากราคา ณ วันที่ 28 มิถุนายน 2010 โดยกลุ่มตัวอย่าง

ภาพที่ 3.2 ภาพภายในและด้านหน้าร้านของเก่า-ใต้ทางด่วนประชาอุทิศ

ภาพที่ 3.3 ภาพภายในและด้านหน้าร้านของเก่าป๋าห่อง-สุขสวัสดิ์76

3.1.2 ท่อกระดาษกลุ่มธุรกิจสิ่งทอ

จากการสำรวจกลุ่มธุรกิจสิ่งทอบริเวณพาหุรัด สำเพ็ง และ ราชวงศ์ พบว่าในการใช้งานท่อกระดาษเพื่อเป็นแกนให้กับผ้าทำให้สะดวกทั้งในการขนย้าย และจัดเก็บ มักไม่ค่อยมีที่

เหลือใช้ แต่จะนำกลับไปม้วนใหม่ เพื่อใช้ในผ้าล๊อตต่อไปเสมอ ปริมาณท่อกระดาษเหลือใช้จึงไม่มากพอที่จะนำมาเป็นวัสดุก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม สิ่งที่น่าสนใจคือ ท่อกระดาษที่ใช้ในกลุ่มธุรกิจสิ่งทอบริเวณพาหุรัด สำเพ็ง และ ราชวงศ์ กลับมีขนาดเดียวกันกับกลุ่มโรงงานทอผ้าที่สุขสวัสดิ์ จึงพอจะอนุมานได้ว่า “ท่อกระดาษขนาด ยาว 180 เซนติเมตร 6.35 เซนติเมตร” เป็นท่อกระดาษที่มีแพร่หลาย และหาง่ายที่สุดในกรุงเทพฯ (ท่อกระดาษขนาด ยาว 110 เซนติเมตร 3.35 เซนติเมตร เล็กเกินกว่าจะนำไปใช้จึงไม่ถือว่าไม่นับ)

ภาพที่ 3.4 ม้วนผ้าที่ใช้แกนเป็นท่อกระดาษ

ตารางที่ 3.3 ท่อกระดาษในกลุ่มธุรกิจสิ่งทอบริเวณพาหุรัด สำเพ็ง และราชวงศ์

ลักษณะท่อ	ที่มา	ขนาด	น้ำหนัก	ภาพ
No.05 ท่อแกนผ้าใหญ่	แกนกระดาษม้วนผ้าที่ใช้ในร้านค้าผ้าขายปลีก	A : 180.35 cm. B : 5.45 cm. C : 6.35 cm. D : 0.45 cm.	838 g.	
No.07 ท่อแกนผ้าเล็ก	แกนกระดาษม้วนผ้าจากโรงงานทอผ้า	A : 110.64 cm. B : 3.20 cm. C : 3.35 cm. D : 0.15 cm.	139 g.	

3.1.3 ท่อกระดาษตามสั่ง

พร้อมๆกับการสำรวจท่อกระดาษเหลือใช้ ในบริเวณย่านพาหุรัด สำเพ็ง และราชวงศ์ จึงพบว่าแหล่งผลิตท่อกระดาษเป็นโรงงานขายส่งอยู่ในตรอกโรงเจ บริเวณท่าเรือราชวงศ์ จากการสอบถามราคาโดยใช้เกณฑ์จากท่อกระดาษทำให้ทราบราคาดังนี้

ภาพที่ 3.5 ร้านชัยเจริญ ค้าเชือกฟางและท่อกระดาษ

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบราคาท่อกระดาษ ระหว่าง ของเก่า(มือสอง) กับ ของใหม่ (มือหนึ่ง)

ท่อกระดาษ	**ขนาด** 180.0cm. x 6.40cm.
ราคาของค้างสต๊อค	15 บาท/ กิโลกรัม
ราคาของสั่งใหม่	20 บาท/ กิโลกรัม (สั่งอย่างน้อย 500 ต้น)

จึงเทียบเป็นราคาได้ดังนี้

ราคาของค้างสต๊อค	17 บาท/ กิโลกรัม หรือ 8.5 เท่าของราคาของเก่า
ราคาของสั่งใหม่	23 บาท/ กิโลกรัม หรือ 7.6 เท่าของราคาของเก่า

โดยท่อกระดาษขนาดยาว 180.00 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.40เซนติเมตร จะเป็นขนาดที่แพร่หลายที่สุด จึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด หากจะนำท่อกระะดาษซึ่งเป็นของเหลือใช้มาใช้ในงานออกแบบ แต่ความต้องการความเที่ยงตรงในงานวิจัย จึงได้เลือกใช้ท่อกระดาษซึ่งเป็นของใหม่จากโรงงานแทน เพื่อตัดปัญหาความบอบช้ำและความชื้นที่จะทำให้ท่อกระดาษพัง

3.2 การออกแบบการทดลองเพื่อรับแรงของท่อกระดาษ

จากการวิจัยการก่อสร้างโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษ ผู้วิจัยจึงต้องทดลองความสามารถในการรับแรงของท่อกระดาษ จากลักษณะของท่อกระดาษนั้นมีลักษณะเด่นไปทางการรับแรงอัดมากกว่าแรงดึงจึงได้เน้นการออกแบบการทดสอบไปที่การรับแรงอัดเป็นสำคัญ โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนคือ การรับแรงอัด แรงดัด และแรงดึง

1. **การรับแรงอัด**

รูปแบบการโก่งเดาะ	
ค่า K ทางทฤษฎี	1.0
ค่า K ในการออกแบบ	1.0

ภาพที่ 3.6 ภาพแสดงลักษณะที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงอัดตามแนวแกน

สามารถคำนวณค่าการรับแรงได้จากสูตร $K^1=W/L$

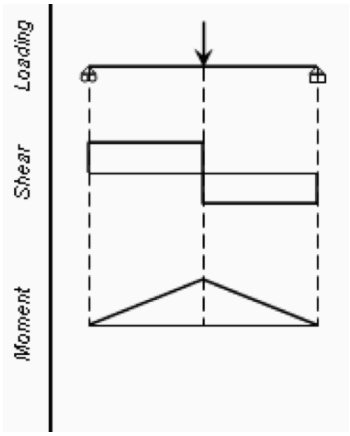
เมื่อ K^1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการรับแรงอัดตามแนวแกน

W เป็นน้ำหนักของแรง

L เป็นความยาวของท่อกระดาษ

โดยเมื่อทราบค่า K จากการทดลองแล้ว จะทำให้สามารถนำไปคำนวณหาความสามารถในการรับแรงกดที่ความยาวต่างๆได้ต่อไป

2. **การรับแรงดัด**



ภาพที่ 3.7 ภาพแสดงลักษณะที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงอัดตามแนวแกน

สามารถคำนวณค่าการรับแรงได้จากสูตร $K^2 \bullet L=W/2$

เมื่อ K^2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการรับแรงตั้งฉากกับแนวแกน

W เป็นน้ำหนักของแรงกด

L เป็นความยาวของท่อกระดาษ

โดยเมื่อทราบค่า K^2 จากการทดลองแล้ว จะทำให้สามารถนำไปคำนวณหาความสามารถในการรับแรงกดที่ความยาวต่างๆได้ต่อไป

3. **การรับแรงดึง**

การทดสอบการรับแรงดึง ทำโดยจัดท่อกระดาษในแนวตั้ง และใช้แรงดึงออกจากกันตามแนวแกน จนกว่าท่อกระดาษจะขาด ถือเป็นแรงวิกฤติ

3.2.1 **ลักษณะของท่อกระดาษที่ใช้ในการทดลองรับแรงของท่อกระดาษ**

ในการทดลองคุณลักษณะทางการรับแรงของท่อกระดาษนี้ ได้แบ่งท่อกระดาษที่จะนำมาใช้เป็น 2 ชนิดคือ

1. ท่อกระดาษขนาด 60x1800 มิลลิเมตร ต่อไปจะเรียกว่า “ท่อกระดาษขนาดใหญ่” ซื้อท่อกระดาษขนาดใหญ่นั้นสามารถหาซื้อเป็นของเก่าได้ โดยมีแหล่งอยู่ตามแหล่งค้าขายผ้าเช่น ย่านราชวงศ์ พาหุรัด หรือตามย่านที่มีโรงงานผ้าเช่น สุขสวัสดิ์เป็นต้น

ภาพที่ 3.8 แหล่งขายท่อกระดาษทั้งของใหม่และของใช้แล้ว

2. ท่อกระดาษขนาด 40x2000 มิลลิเมตร เป็นท่อกระดาษที่สั่งทำขึ้นเพื่อให้เข้ามาตรฐานของข้อต่อนั่งร้านซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป ต่อไปจะเรียกว่า “ท่อกระดาษขนาดเล็ก” ซึ่งท่อกระดาษขนาดเล็ก ใช้วิธีสั่งทำจากโรงงานผลิตแกนกระดาษและกระดาษลัง โดยขนาดที่ใช้จะมีความหนาเท่ากับแกนกระดาษที่ไว้เสริมความแข็งแรงในมุมกล่องกระดาษเพื่อใช้ในการขนส่งนั้นเอง

ภาพที่ 3.9 สภาพภายในโรงงานผลิตท่อกระดาษและการขนส่งท่อกระดาษ

ทั้งนี้เพื่อนำมาเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียและความคุ้มค่าก่อนการออกแบบเป็นโครงสร้างเพื่อรับพื้นต่อไป

3.2.2 เตรียมการทดสอบ

ทำการกำหนดจุดเพื่อให้การตัดนั้นได้ฉากขนานกันเพื่อนำไปทดสอบ จึงต้องมีการใช้กระดาษร่างตามเส้นรอบวงเป็นแนวไว้เสียก่อน

เมื่อได้ท่อกระดาษที่จะนำมาใช้แล้วจึงนำมาตัดเพื่อให้ได้ความยาวตามที่ต้องการ โดยใช้เลื่อยตัดเหล็กหั่นท่อกระดาษไล่ไปต่อเส้นรอบวง

ภาพที่ 3.10 ก่อนทำการตัดควรวาดเส้นรอบวงเพื่อให้การตัดมีความเที่ยงตรง

ในการเลื่อยตัดนั้น หากไม่ได้ใช้เครื่องมือไฟฟ้าช่วยในการตัดแล้วนั้น ก็จะเป็นการยากในการตัดให้รอยตัดเรียบและตรงจึงมีเทคนิคที่พบในระหว่างทำการวิจัยคือ หากเลื่อยตัดด้วยมือแล้วนั้นให้หมุนท่อสวนทางกับการเลื่อย เมื่อทำเช่นนี้แล้วก็จะได้รอยตัดที่เรียบเนียนได้ฉากเสมอกัน

ภาพที่ 3.11 ใช้เลื่อยมือเป็นเครื่องมือในการตัด

ภาพที่ 3.12 ตรวจสอบความยาวของท่อกระดาษ

หลังจากตัดเลื่อยตามขนาดที่ต้องการเสร็จแล้ว จึงทำการตรวจสอบความยาวท่ออีกครั้ง เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงควรตัดท่อกระดาษให้มีความยาวกว่าความยาวที่จะใช้จริงไว้เล็กน้อย เพื่อเวลาผิดพลาดจะได้สามารถขัดตบแต่งให้สั้นลงพอดีได้นั่นเอง

ภาพที่ 3.13 รอยตัดของท่อกระดาษหลังขัดตกแต่งแล้ว

ขัดตบแต่งปลายท่อกระดาษให้เรียบร้อย เพื่อที่เมื่อทดสอบปลายที่ได้ฉากเรียบร้อยจะไม่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบ

ภาพที่ 3.14 เครื่องตัดเหล็กสำหรับขั้นตอนในการทำตัวจับปลายท่อ

จัดทำเครื่องมือในการทดสอบ โดยใช้ท่อเหล็กประดิษฐ์ขึ้นเป็นตัวจับปลายท่อทั้งสองด้าน โดยใช้หลักการหนับจับเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่จะเกิดกับปลายท่อในการฉีกขาดและการหนีบจับยังใช้แรงเสียดทานจึงสามารถกระจายแรงในการทดสอบไปได้จนทั่วท่อกระดาษ

ภาพที่ 3.15 ตัวจับปลายท่อเมื่อแล้วเสร็จ

เครื่องมือจับปลายท่อกระดาษเมื่อแล้วเสร็จ ชิ้นส่วนสามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วน คือ

1. แกนเหล็กสอดด้านในเป็นตัวรับสกรูยึด
2. ประกับภายนอกที่ใช้น๊อตร้อยเข้ากับแกนเหล็ก
3. น๊อตยึด

ภาพที่ 3.16 ใช้ตะปูเกลียวหกเหลี่ยมเป็นตัวยึด

ในการประกอบเข้าด้วยกันนั้น ได้เลือกเอาประแจหกเหลี่ยมมาเป็นตัวยึดเพื่อความสะดวกทั้งในการถอดและประกอบซึ่งสามารถหาเครื่องมือมาจัดการได้โดนง่าย

ภาพที่ 3.17 ระหว่างขั้นตอนการประกอบตัวจับเพื่อเข้ารับการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงของท่อกระดาษ

สามารถทำการทดสอบโดยใช้เพียงบุคคลเพียงคนเดียว (ไม่รวมผู้ควบคุมเครื่องทดสอบ) รูปร่างเมื่อประกอบแกนเหล็กตัวจับเข้ากับปลายท่อกระดาษแล้ว

ภาพที่ 3.18 รูปร่างเมื่อประกอบแกนเหล็กตัวจับเข้ากับปลายท่อกระดาษ

ภาพที่ 3.19 เครื่องทดสอบรุ่น Universal Testing Machine Amsler 20T ขณะทำการทดสอบ

นำเข้าทดสอบในเครื่องทดสอบรุ่น Universal Testing Machine Amsler 20T โดยให้ปากกาจับของเครื่องทดสอบจับเข้ากับแกนเหล็กที่ยื่นออกมาจากตัวจับปลายท่อกระดาษ

ภาพที่ 3.20 บรรยากาศภายในห้องทดสอบวัสดุที่ศูนย์ทดสอบวัสดุแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทดสอบนั้น เราได้ใช้ห้องทดสอบวัสดุที่ศูนย์ทดสอบวัสดุแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นสถานที่ทดสอบ ด้วยว่ามีอุปกรณ์เพียบพร้อมและไม่อยู่ไกลจนเกินไป

ภาพที่ 3.21 เครื่องทดสอบรุ่น Universal Testing Machine Amsler 20T ที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพที่ 3.22 ท่อกระดาษที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบนี้ มีตัวแปรที่ต่างกันคือชนิดของท่อกระดาษ ซึ่งจะมีท่อกระดาษสองขนาดคือ

1. ท่อกระดาษขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ยาว 2 เมตร เรียกว่าท่อขนาดเล็ก

2. ท่อกระดาษขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ยาว 1.8 เมตร เรียกว่าท่อขนาดใหญ่

บทที่ 4
ผลการทดลองการรับแรงของท่อกระดาษ

จากการทดลองการรับแรงของท่อกระดาษ ผู้วิจัยได้ทดลองการรับแรงอัด แรงดัด และแรงดึงกับท่อกระดาษขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก ในความยาวที่แตกต่างกัน จึงได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการทดลองการรับแรงของท่อกระดาษ

ผลการทดลองท่อกระดาษทั้งแรงอัด แรงดัด และแรงดึงนั้น ผลปรากฏว่าท่อกระดาษนั้นสามารถรับแรงดึงได้ดีที่สุด โดยสามารถรับได้สูงสุดถึง 620 กิโลกรัม รองลงมาคือการรับแรงอัด สามารถรับได้ถึง 385 กิโลกรัม ในขณะที่สามารถรับแรงดัดได้น้อยมาก คือสามารถรับได้เพียง 30 กิโลกรัมเท่านั้น

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการรับแรงอัด แรงดัด และแรงดึงของท่อกระดาษ

ความยาว (cm.)	แรงอัด (kgf)				แรงดัด (kgf)		แรงดึง (kgf)	
	ท่อเล็ก		ท่อใหญ่		ท่อเล็ก	ท่อใหญ่	ท่อใหญ่	
	1	2	1	2	1	2	1	2
40	386	365	330	350	-	-	-	-
60	360	325	310	340	30	30	450	410
80	290	310	300	320	22	25	570	600
120	-	-	-	-	10	15	610	620

4.2 การทดลองแรงอัด

การทดลองการรับแรงอัด(Compression Test) การทดลองการรับแรงอัด ทำโดยจัดท่อกระดาษในแนวตั้ง และปล่อยแรงกระทำลงไปในแนวแกน จนกว่าท่อกระดาษจะหัก ถือเป็นแรงวิกฤติ แสดงดังภาพที่ 4.18 และได้ผลการทดลองดังนี้

ภาพที่ 4.1 การทดลองแรงอัดกับท่อกระดาษ

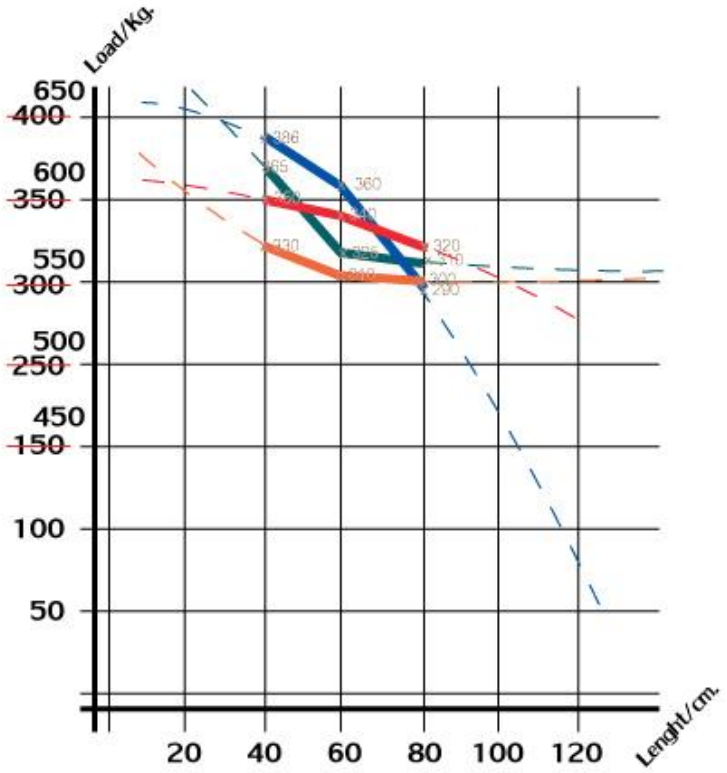
จากสูตรการคำนวณที่ ชิเกรุ บัน ใช่ในผลงานชื่อ Library of a Poet เป็นสูตรคำนวณที่ใช่หาค่าแรงวิกฤติจากแรงอัด โดยคิดเป็นหน่วยแรงต่อตารางเซนติเมตร เมื่อนำมาคำนวณกับผลการทดลองได้ผลออกมาดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 และภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ของท่อกระดาษ แรงอัด และแรงอัดต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของท่อกระดาษขนาดเล็ก

ท่อกระดาษขนาดเล็ก	A (cm^2)	P (kgf)	δ (kgf/cm^2)
80 ซม.	5.50	300	54.54
60 ซม.	5.50	342.5	62.27
40 ซม.	5.50	375.5	68.27
เฉลี่ย	5.50	339.33	54.54

ตารางที่ 4.3 พื้นที่ของท่อกระดาษ แรงอัดและแรงอัดต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของท่อกระดาษขนาดใหญ่

ท่อกระดาษขนาดใหญ่	A (cm^2)	P (kgf)	δ (kgf/cm^2)
80 ซม.	8.64	310	35.88
60 ซม.	8.64	325	37.62
40 ซม.	8.64	340	39.35
เฉลี่ย	8.64	325	37.62



ภาพที่ 4.2 แรงอัดที่กระทำต่อท่อกระดาษ

ในการทดลองการรับแรงอัดของท่อกระดาษที่ใช้ในงานออกแบบของชิเกรุ บัน โดย ดร.มิโนรุเทตซึกะ และ นายคาซึโอะ อิโต้ เมื่อนำมาคำนวณกับผลการทดลองจะได้ค่าการรับแรงออกมาดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความสามรถในการรับแรงอัดระหว่างท่อกระดาษญี่ปุ่นและท่อกระดาษไทย

		แรงอัด (kgf/cm^2)		
ขนาดท่อ	**พื้นที่** (cm^2)	**ท่อกระดาษญี่ปุ่น**	**ท่อกระดาษญี่ปุ่น**	**ε**
เล็ก	8.64	$N = \frac{8.64\,cm^2 \times 103.20 \frac{kgf}{cm^2}}{3} = 297.22\,kgf$	$N = \frac{8.64\,cm^2 \times 37.61 \frac{kgf}{cm^2}}{3} = 108.31\,kgf$	63.55 %
ใหญ่	5.50	$N = \frac{5.50\,cm^2 \times 103.20 \frac{kgf}{cm^2}}{3} = 189.12\,kgf$	$N = \frac{5.50\,cm^2 \times 54.54 \frac{kgf}{cm^2}}{3} = 99.99\,kgf$	47.12 %

เมื่อเปรียบเทียบความทนทานต่อแรงอัดระหว่างท่อกระดาษของประเทศญี่ปุ่นและท่อกระดาษของประเทศไทย ผลปรากฏว่าท่อกระดาษของญี่ปุ่นมีความแข็งแรงกว่าท่อกระดาษของไทยถึงร้อยละ 300% ซึ่งเป็นผลมาจากคุณภาพของกระดาษและประสิทธิภาพใน

การผลิตเป็นท่อกระดาษ ซึ่งมีความหนาแน่นกว่าท่อกระดาษไทยจึงเป็นผลให้แข็งแรงกว่าในปริมาตรหรือขนาดที่เท่ากัน

ทดสอบโดยการอัดแรงลงไปยังท่อกระดาษในแนวตั้ง โดยให้ท่อกระดาษรับแรงตามแนวแกน ในการรับแรงอัดนั้น ท่อกระดาษสามารถรับแรงอัดได้ถึงเกือบ 400 กิโลกรัม ซึ่งพฤติกรรมในการรับแรงอัดนั้นจะแปรผกผันกับความยาวของตัวท่อกระดาษ ในขณะที่แม้เส้นผ่าศูนย์กลางนั้นจะต่างกัน แต่ก็ยังรับแรงได้เท่ากัน

4.3 การทดลองแรงดัด

การทดลองการรับแรงดัด(Bending Test) การทดลองการรับแรงดัด ทำโดยจัดท่อกระดาษในแนวนอน พาดอยู่ระหว่างแท่งเหล็กสองแท่งให้กึ่งกลางลอยไว้ และปล่อยแรงกระทำลงไปในแนวตั้งฉากกับแนวแกนจนกว่าท่อกระดาษจะหัก ถือเป็นแรงวิกฤติแสดงดังภาพที่ 4.20 และได้ผลการทดลองดังนี้

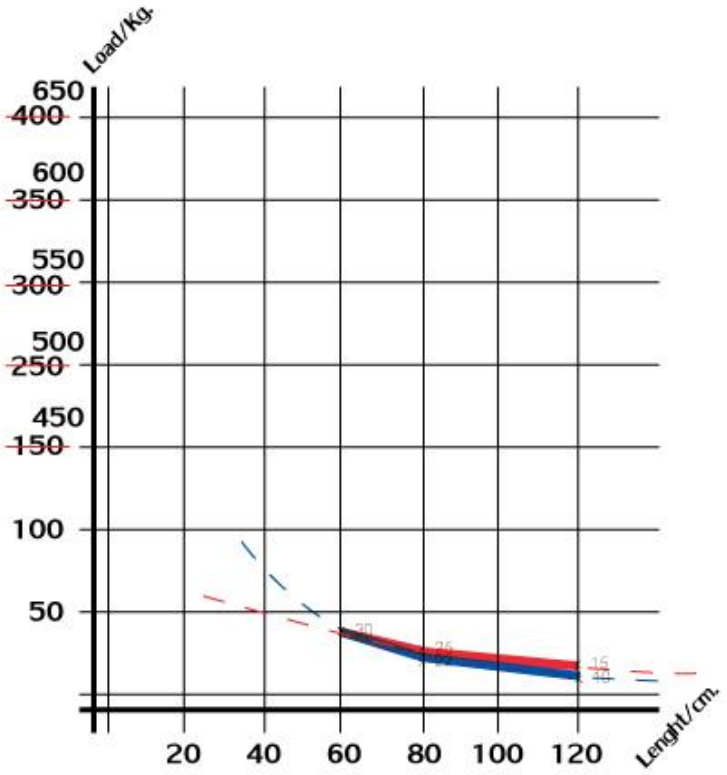
ภาพที่ 4.3 การทดลองแรงดัดกับท่อกระดาษ

ตารางที่ 4.5 แรงดัดที่กระทำกับท่อกระดาษ

ขนาดท่อ(ซม.)	แรงที่กระทำกับท่อ(kgf)		เปอร์เซนต์ความแตกต่าง
	เล็ก	ใหญ่	
120	10	15	40 %
80	22	25	13 %
60	30	30	0 %

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการเปรียบเทียบรายคู่ของแรงดัดที่กระทำกับท่อกระดาษ

เปรียบเทียบรายคู่	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในการเปรียบเทียบรายคู่ของแรงดัดที่กระทำกับท่อกระดาษ (kgf)	
	เล็ก	ใหญ่
120-60	100%	75%
120-80	75%	63%
80-60	31%	19%



ภาพที่ 4.4 แรงดัดที่กระทำต่อท่อกระดาษ

ทดสอบโดยการพาดท่อกระดาษตามแนวระนาบกับพื้นและลงน้ำหนักกดลงมากึ่งกลางท่อเพื่อหาว่าท่อกระดาษจะถูกดัดได้เท่าไรจึงหักลง การรับแรงดัดของท่อกระดาษนั้นสามารถรับได้ไม่เกินกว่า 30 กิโลกรัม แต่จากกราฟที่ค่อยๆเป็นเส้นระนาบนั้น ทำให้พออนุมานได้ว่า เมื่อถึงจุดหนึ่งที่ความยาวท่อเกินกว่า 1.5 เมตรขึ้นไป การรับแรงดัดของท่อกระดาษจะคงตัวอยู่ที่ 10 กิโลกรัม ซึ่งเป็นผลมาจากตัวเนื้อวัสดุเอง ไม่ใช่ผลจากความยาวที่เพิ่มขึ้น

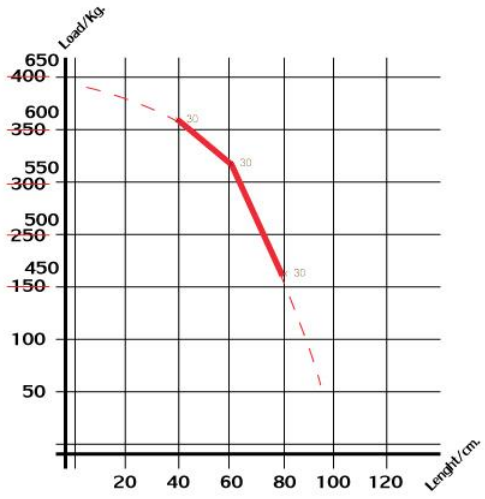
4.4 การทดลองแรงดึง

การทดลองการรับแรงดึง(Tension Test) การทดลองการรับแรงดึง ทำโดยจัดท่อกระดาษในแนวตั้ง และใช้แรงดึงออกจากกันตามแนวแกน จนกว่าท่อกระดาษจะขาด ถือเป็นแรงวิกฤติแสดงดังภาพที่ 4.22 และได้ผลการทดลองดังนี้

ภาพที่ 4.5 การทดลองแรงดึงกับท่อกระดาษ

ตารางที่ 4.7 แรงดึงที่กระทำกับท่อกระดาษใหญ่

ขนาดท่อ(ซม.)	แรงที่กระทำกับท่อกระดาษขนาดใหญ่(kgf)	
	1	2
120	610	620
80	570	600
60	450	410



ภาพที่ 4.6 แรงดึงที่กระทำต่อท่อกระดาษ

การทดลองการรับแรงดึงกระทำโดยใช้ตัวจับยึดท่อกระดาษในแนวตั้งและออกแรงดึงออกจากกัน ในการรับแรงดึงนั้น ท่อกระดาษสามารถรับแรงดึงได้ดีที่สุดจากทั้งสามการทดลอง คือสามารถรับได้ถึง 600 กิโลกรัม ข้อสังเกตหนึ่งของพฤติกรรมท่อกระดาษระหว่างการทดลองก็คือ ท่อกระดาษจะเริ่มขาดออกจากกันตามแนวรอยต่อของการม้วนท่อกระดาษ จึงสรุปได้ว่าทั้งที่ท่อกระดาษน่าจะรับแรงดึงได้เท่ากันตลอดทั้งท่อนแต่กลับมีความเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับแรงไปตามความยาวของท่อที่เปลี่ยนไปนั้น เป็นเพราะยิ่งท่อกระดาษยาวเท่าไร ก็จะยิ่งมีพื้นที่ซึ่งเป็นรอยต่อในการม้วนท่อกระดาษมาขึ้นเท่านั่นเอง ความเป็นไปได้ในการแยกออกจากกันของท่อกระดาษจึงยิ่งมีมากตามไปด้วย

4.5 ผลการเปรียบเทียบการทดลอง

ท่อกระดาษมีความสามารถในการรับแรงได้ในระดับหนึ่ง เมื่อถึงความยาวหนึ่งๆ ท่ออกระดาษจะไม่สามารถรับแรงไปได้มากกว่านั้นอีก ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟที่ค่อยๆวิ่งเป็นระนาบเมื่อท่อกระดาษยิ่งยาวขึ้น เมื่อพิจารณาเห็นว่าท่อกระดาษมีพฤติกรรมในการรับแรงกระทำเป็นรูปพาราโบลา จึงสามารถใช้สูตรสมการพาราโบลา $x = ay^2 + by + c$, $a \neq 0$ คำนวณการรับแรงของท่อกระดาษในความยาวต่างๆได้ดังสมการที่ 4.1 ถึง 4.5 ตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.24 ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้ต่อไป

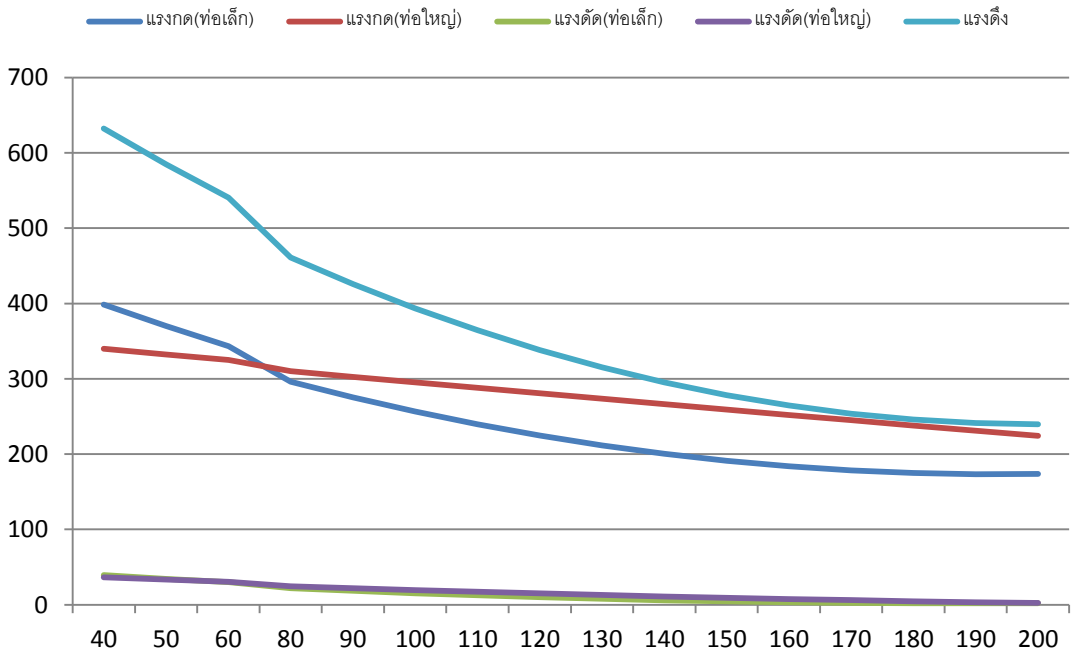
สมการแรงอัดของท่อกระดาษเล็ก	$N=531.56-(3.71)L+(0.009)L^2$	.....(4.1)
สมการแรงอัดของท่อกระดาษใหญ่	$N=370.77-(0.078)L+(0.0002)L^2$	.....(4.2)
สมการแรงดัดของท่อกระดาษเล็ก	$N=50.34-(0.37)L+(0.0006)L^2$	.....(4.3)
สมการแรงดัดของท่อกระดาษใหญ่	$N=62.00-(0.63)L+(0.0016)L^2$	.....(4.4)
สมการแรงดึง	$N=852.27-(6.11)L+(0.015)L^2$	.....(4.5)

ตารางที่ 4.8 แรงกระทำต่อท่อกระดาษขนาดเล็กและขนาดใหญ่ จำแนกตามแรงที่มากระทำและความยาวของท่อกระดาษ

ความยาว (cm.)	**แรงอัด** (kgf)		**แรงดัด**(kgf)		**แรงดึง** (kgf)
	ท่อขนาดเล็ก	**ท่อขนาดใหญ่**	**ท่อขนาดเล็ก**	**ท่อขนาดใหญ่**	
40	398.49094	340.0422	39.3334	36.4335	632.2775
50	370.02778	332.4706	34.5000	33.2932	584.8908
60	343.48596	324.9432	30.0000	30.2873	540.5485
80	296.16634	310.0206	22.0000	24.6782	460.9977
90	275.38855	302.6254	18.5001	22.0750	425.7891
100	256.5321	295.2743	15.3334	19.6062	393.6250

ตารางที่ 4.8 แรงกระทำต่อท่อกระดาษขนาดเล็กและขนาดใหญ่ จำแนกตามแรงที่มากระทำและความยาวของท่อกระดาษ

ความยาว (cm.)	แรงอัด (kgf)		แรงดัด(kgf)		แรงดึง (kgf)
	ท่อขนาดเล็ก	ท่อขนาดใหญ่	ท่อขนาดเล็ก	ท่อขนาดใหญ่	
110	239.59699	287.9672	12.5001	17.2716	364.5055
120	224.58322	280.7042	10.0001	15.0712	338.4305
130	211.4908	273.4854	7.8334	13.0052	315.4000
140	200.31972	266.3106	6.0001	11.0734	295.4141
150	191.06998	259.1798	4.5001	9.2759	278.4728
160	183.74158	252.0932	3.3335	7.6126	264.5759
170	178.33452	245.0506	2.5002	6.0836	253.7236
180	174.8488	238.0521	2.0002	4.6889	245.9159
190	173.28443	231.0977	1.8335	3.4285	241.1527
200	173.6414	224.1874	2.0002	2.3023	239.4340



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบการรับแรงในความยาวต่างๆของท่อกระดาษ จำแนกตามแรงที่กระทำ

4.6 ผลสรุปจากทดลองและข้อเสนอแนะ

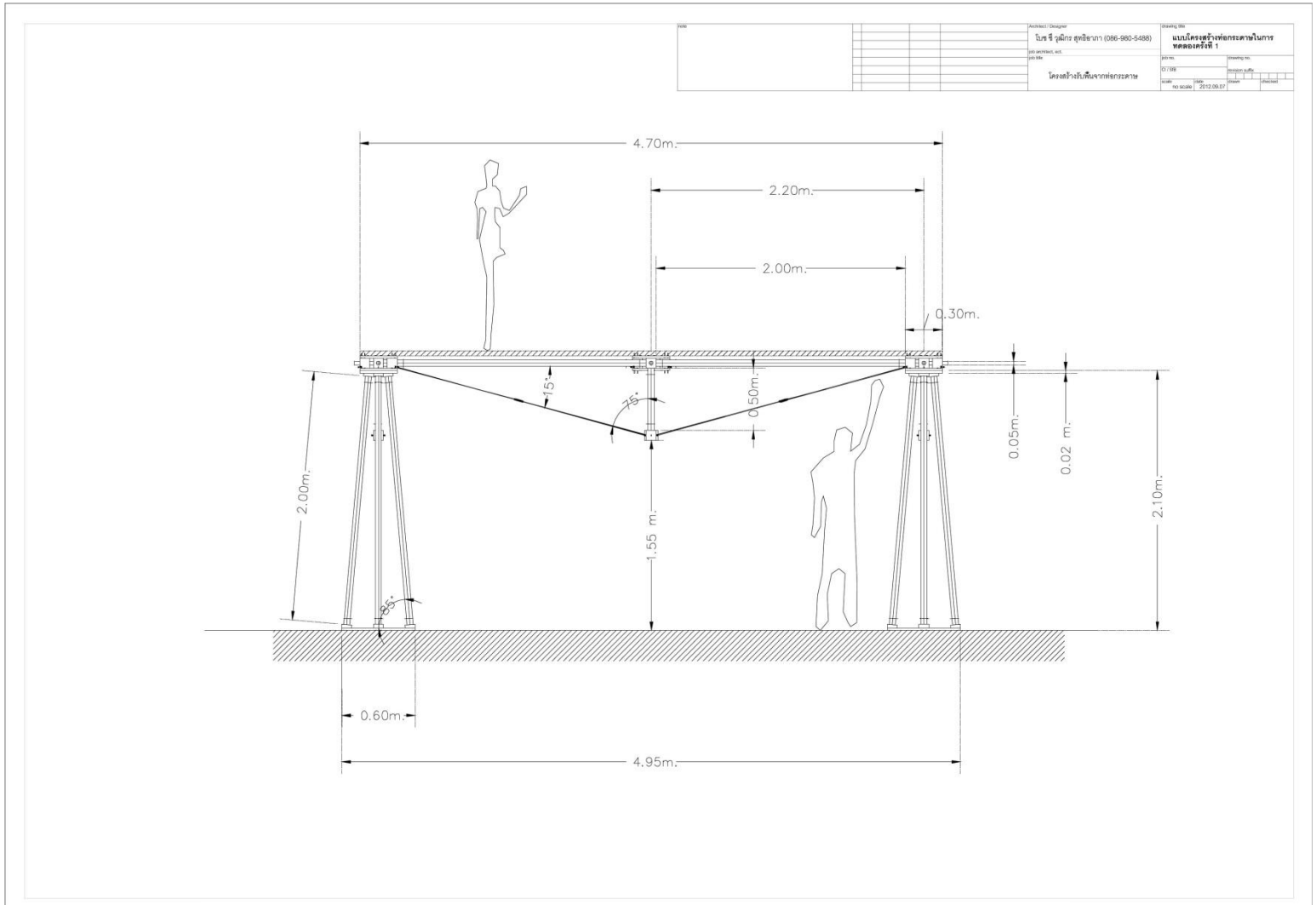
ท่อกระดาษสามารถรับแรงดึงได้ดีที่สุด รองลงมาคือแรงอัด และไม่ควรใช้รับแรงดัดเมื่อถึงความยาวระดับหนึ่งท่อกระดาษจะสามารถรับแรงได้ในขนาดที่คงที่(ในที่นี้คือ 1.8 เมตร) ทั้งนี้ในการออกแบบควรใช้ระบบโครงถักในการออกแบบท่อกระดาษเพื่อให้ท่อกระดาษนั้นรับแต่แรงดึงและแรงอัดควรใช้ค่าการรับแรงที่น้อยที่สุดของแต่ละหัวข้อเป็นมาตรฐานเพื่อเป็น Safety Factor เผื่อไวสำหรับ Dynamics Load และอุบัติเหตุอื่นๆต่อไปในงานออกแบบ ทั้งนี้จากการทดลองทำให้ทราบว่าท่อกระดาษสามารถรับแรงอัดได้ 37.62 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถรับแรงดึงได้ 49.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสามารถรับแรงดัดได้ 3.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

บทที่ 5
การทดลองก่อสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้น

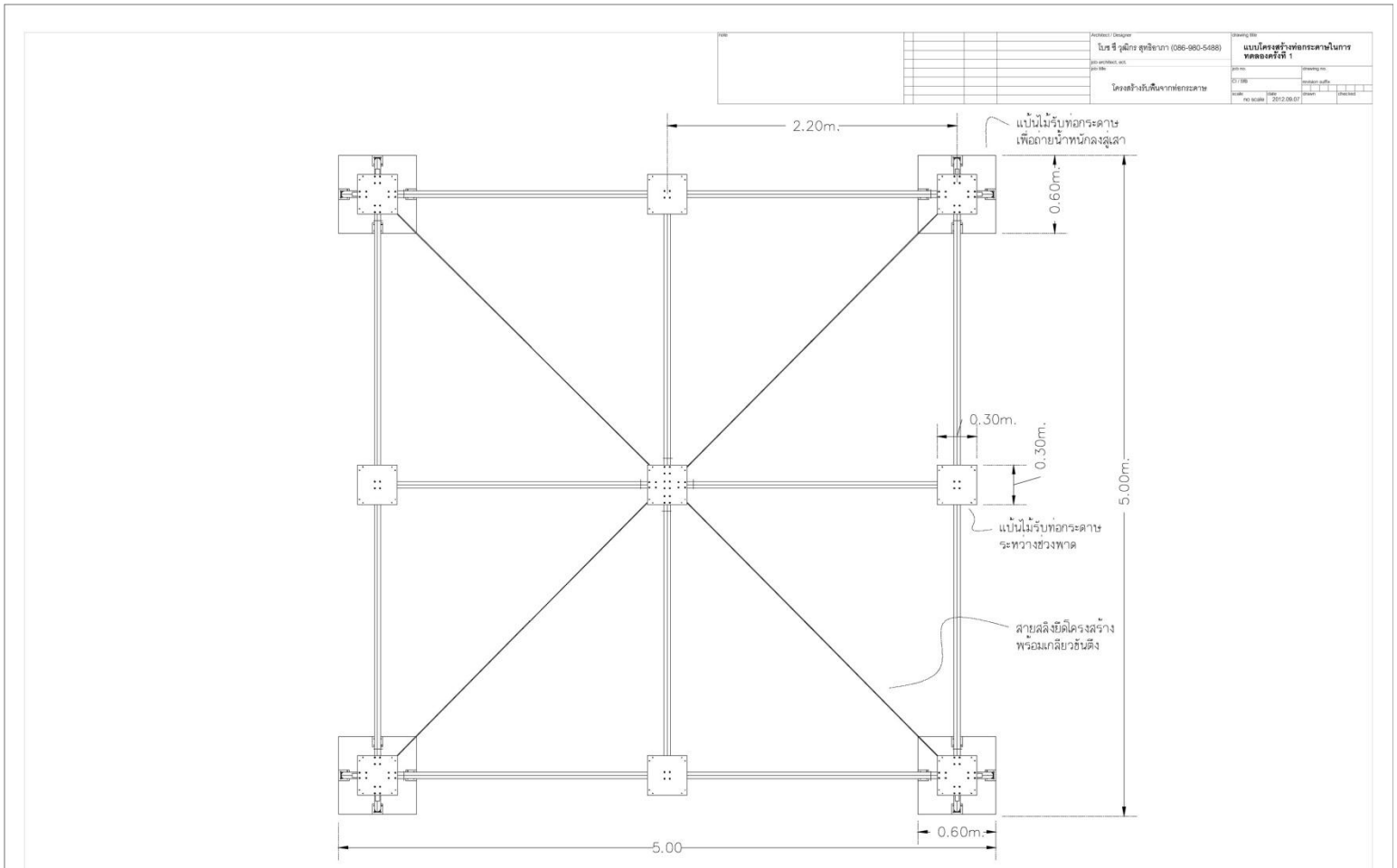
การทดลองก่อสร้างโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษนั้น ทำขึ้นเพื่อพิสูจน์ปัญหาต่างๆที่จะเกิดขึ้นจริงระหว่างก่อสร้าง ทั้งนี้การทดลองไม่ได้มุ่งให้โครงสร้างนั้นรับน้ำหนักได้ดีที่สุด แต่มุ่งให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและขีดจำกัดของท่อกระดาษ เพื่อให้ผู้สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานของท่านอื่นๆต่อไป

5.1 การทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้นครั้งที่ 1

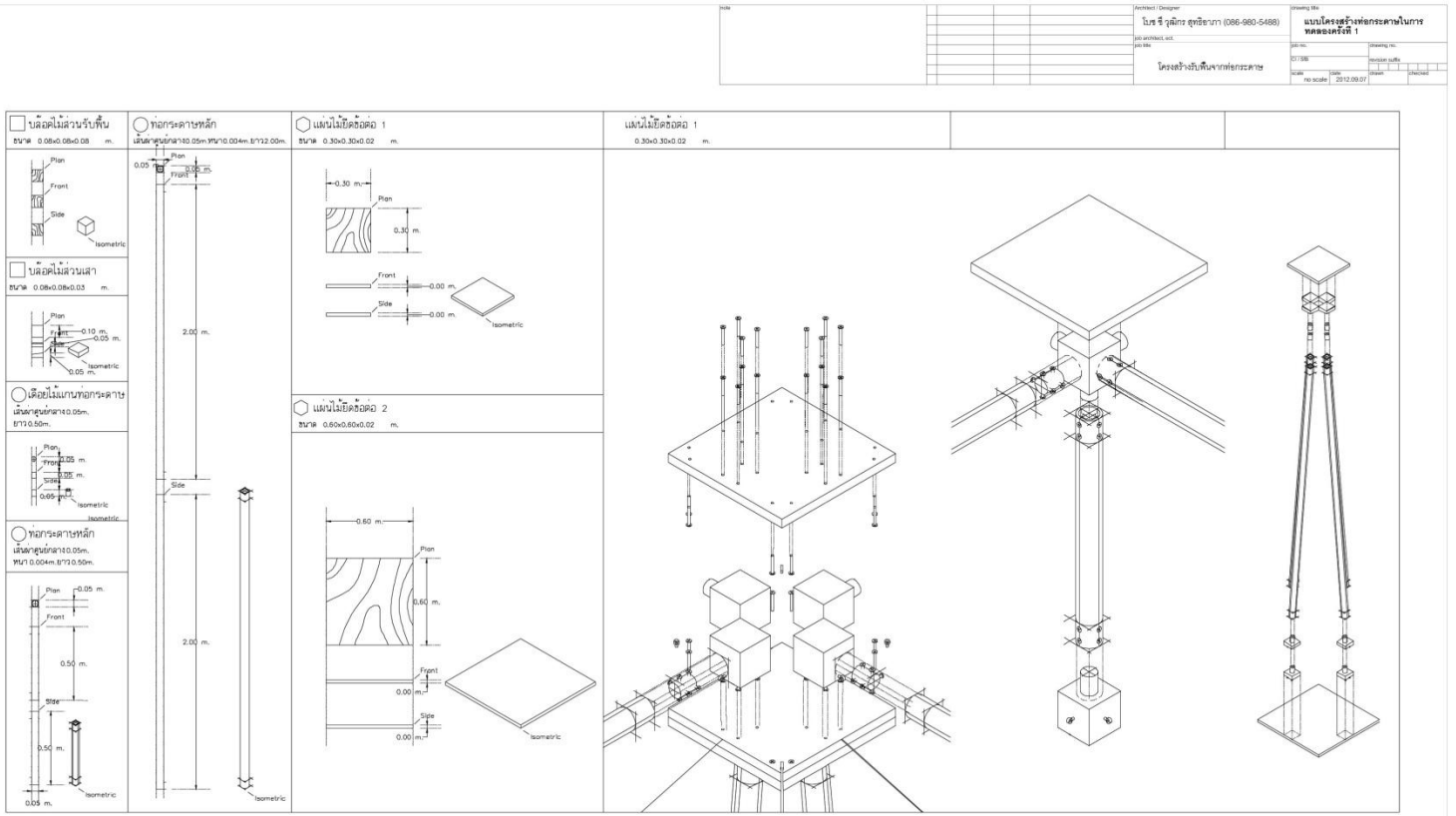
การทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้นครั้งที่ 1 นั้น ผู้วิจัยต้องการทราบถึงพฤติกรรมและข้อจำกัดของการใช้ท่อกระดาษในการทำโครงสร้าง จึงออกแบบให้เป็นโครงสร้างที่มีช่วงพาด 440 x440 เซนติเมตร เหมือนเป็นโครงสร้างรับพื้นของอาคาร ทั้งนี้โครงสร้าง 440 x440 เซนติเมตรนั้นมีที่มาจากการผลิตท่อกระดาษที่ส่วนใหญ่จะอยู่ในความยาวประมาณ 200 เซนติเมตร เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและขนส่ง จึงออกแบบโครงสร้างจากมาตรฐานของการผลิตเป็นสำคัญนั่นเอง



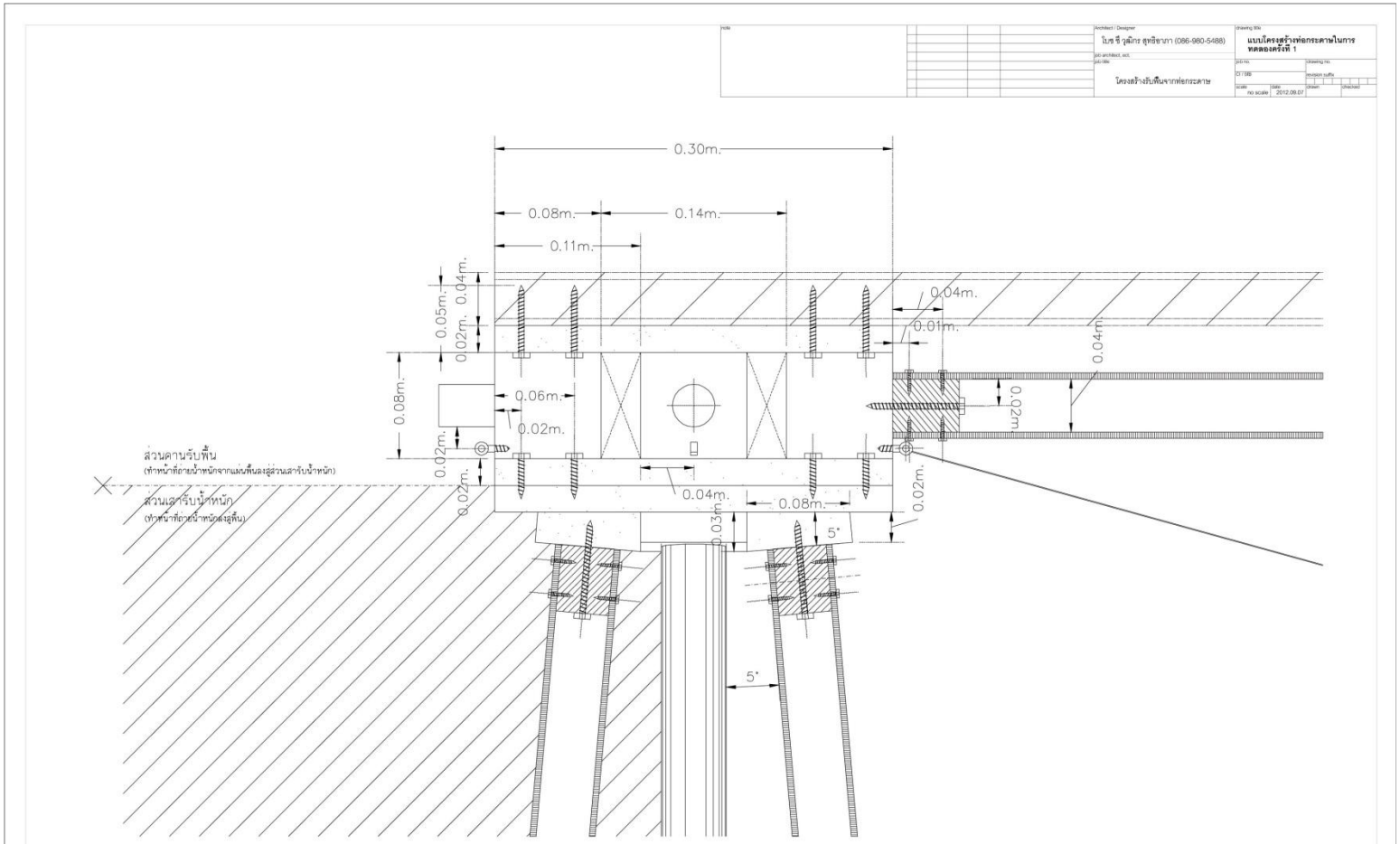
ภาพที่ 5.1 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการทดลองที่1 (1)



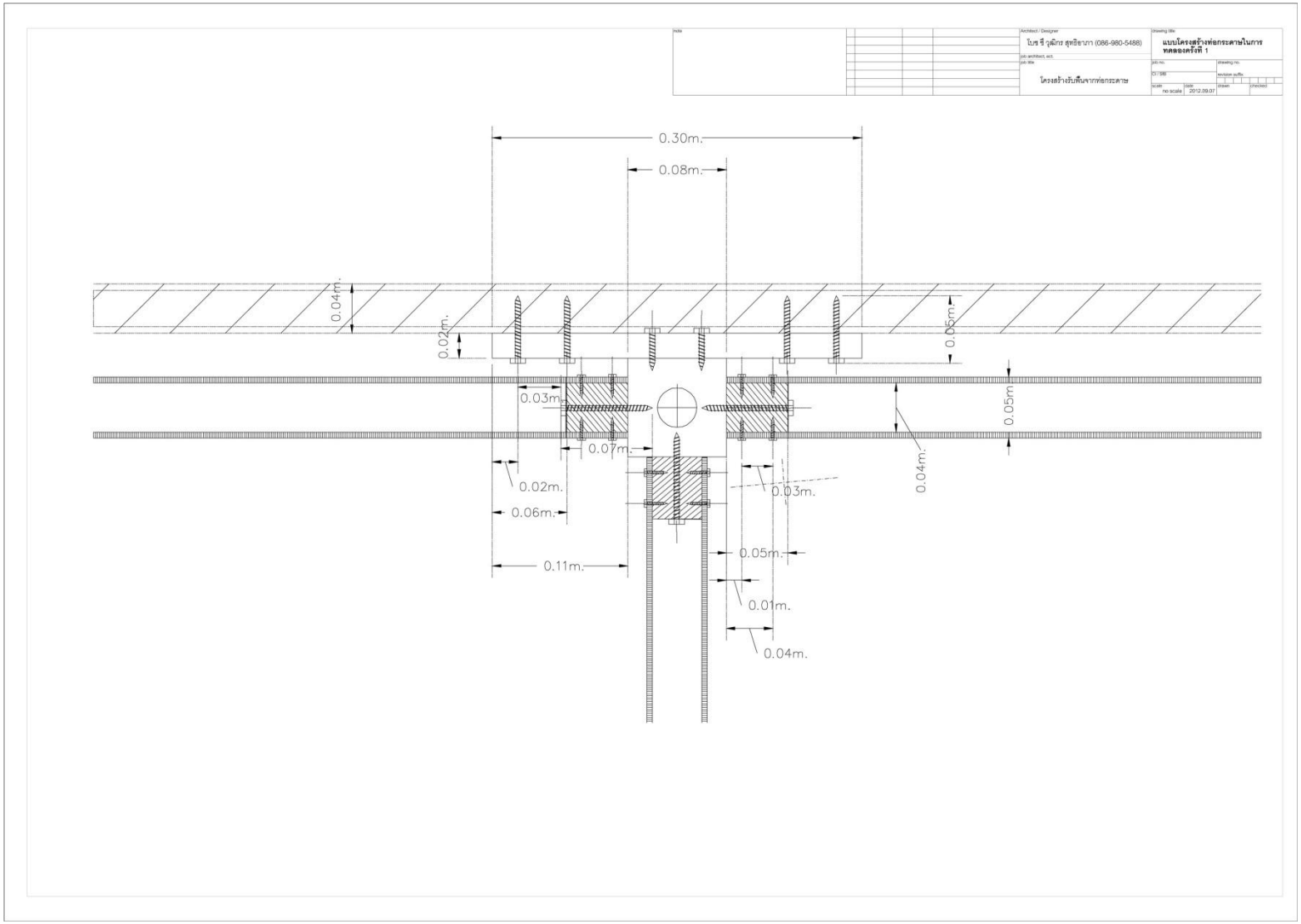
ภาพที่ 5.2 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการทดลองที่1 (2)



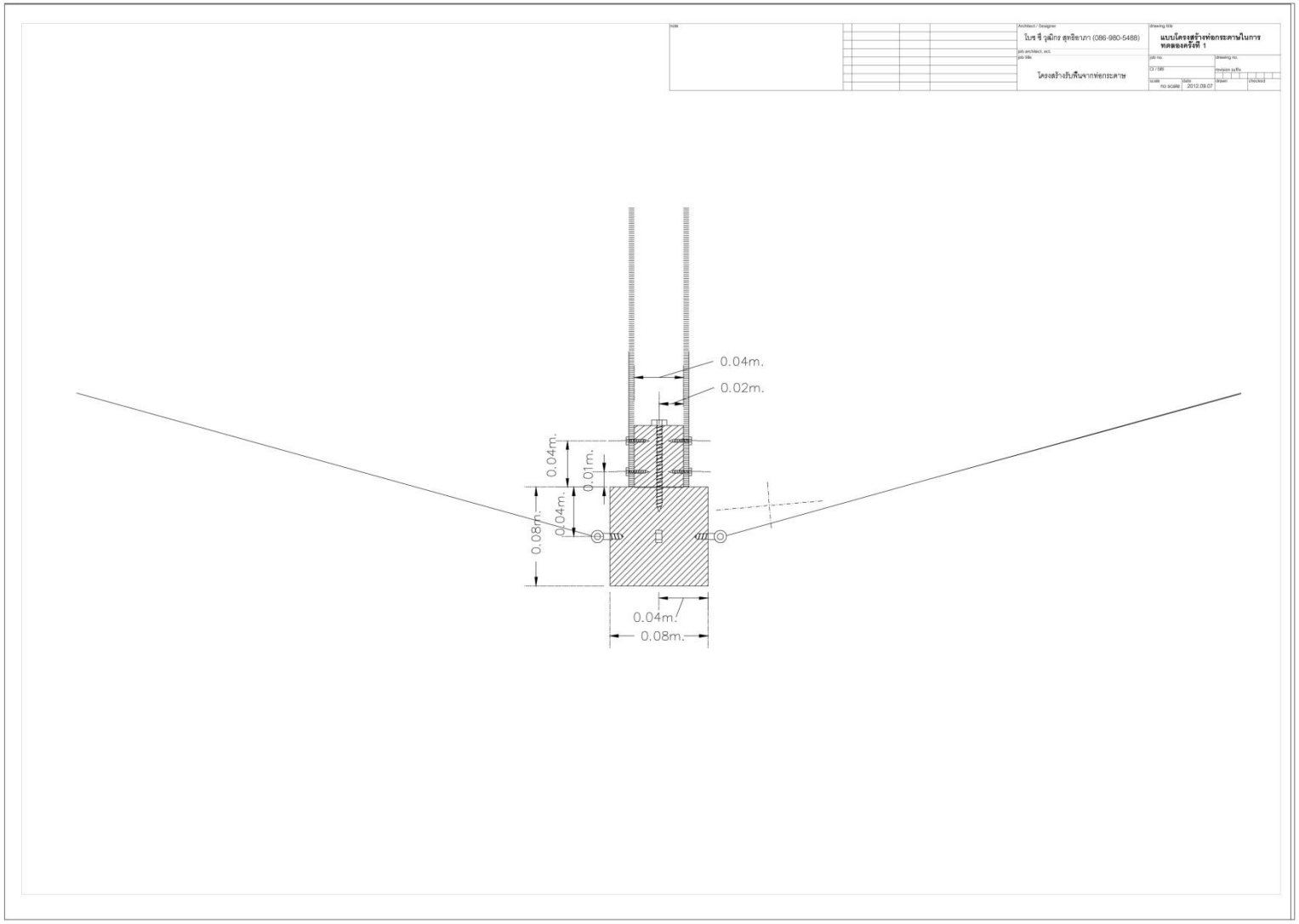
ภาพที่ 5.3 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการทดลองที่1 (3)



ภาพที่ 5.4 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการทดลองที่1 (4)



ภาพที่ 5.5 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการทดลองที่1 (5)



ภาพที่ 5.6 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการทดลองที่1 (6)

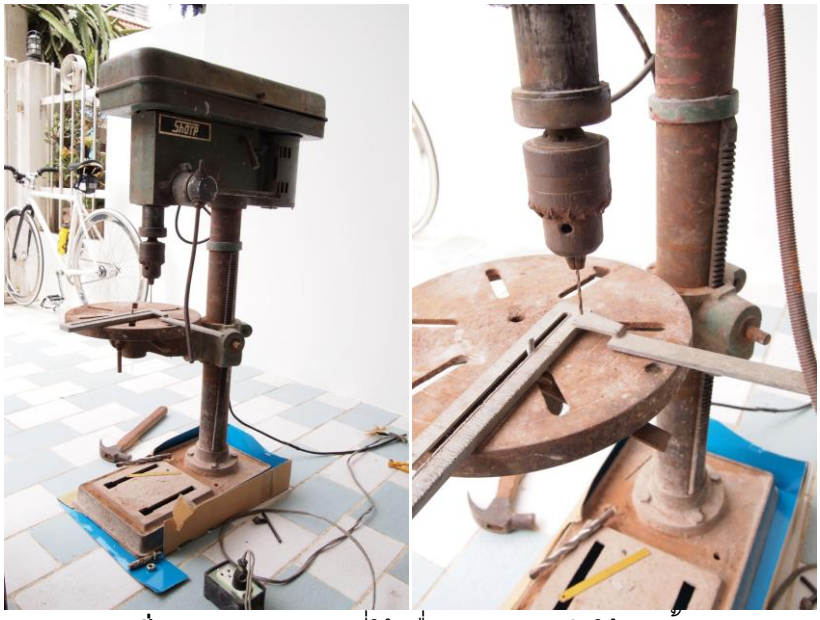
ภาพที่ 5.7 การก่อสร้างโดยใช้เครื่องมือที่มีทั่วไป

การก่อสร้างนี้เริ่มจากการประกอบชิ้นส่วนข้อต่อให้เสร็จเสียก่อนแล้วจึงประกอบส่วนอื่นเข้าไปที่หลังสุดท้ายจึงยกขึ้นให้เป็นคานวางบนแทนในที่สุด

ภาพที่ 5.8 แม่แบบในการเจาะรูบนไม้ใช้แผ่นพลาสติกเพื่อความแม่นยำ

ภาพที่ 5.9 นำแผ่นพลาสติกแม่แบบวางทาบและทำเครื่องหมายลงบนแผ่นไม้

ภาพที่ 5.10 เจาะรูที่เครื่องหมายที่ทำไว้ โดยให้ระวังการเจาะไม่ได้ฉาก



ภาพที่ 5.11 สว่านแทนที่ใช้เพื่อความแม่นยำให้กับชิ้นงาน

ภาพที่ 5.12 การปฏิบัติขณะเจาะแผ่นไม้ด้วยสว่านแท่น

ภาพที่ 5.13 เดือยที่เจาะรูเรียบร้อยแล้ว

ภาพที่ 5.14 ทำเครื่องหมายที่บล๊อกไม้เพื่อเจาะรูตรงจุดกึ่งกลาง

ภาพที่ 5.15 นำบล๊อกไม้เข้าสว่านแท่นเพื่อเจาะรู

ภาพที่ 5.16 สภาพบล็อกไม้เมื่อเจาะรูเรียบร้อยแล้ว

ภาพที่ 5.17 ตีเส้นวัดแผ่นไม้

ในการประกอบบล็อคไม้เข้ากับแผ่นไม้นั้นจะต้องทำการวัดให้ดีเสียก่อน เมื่อประกอบเข้าด้วยกันจะได้แนวที่ถูกต้องจึงควรตีเส้นที่แผ่นไม้เพื่อประกบเข้า

ภาพที่ 5.18 ไขสกรูนำลงไปก่อน

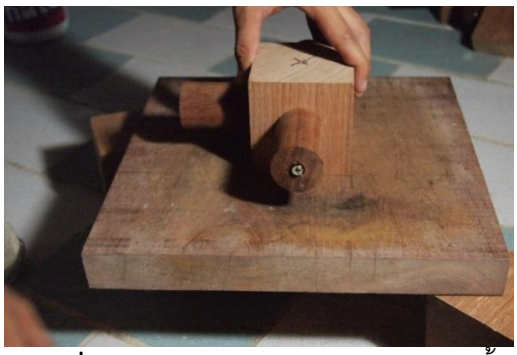
ภาพที่ 5.19 จะเห็นตะปูยื่นออกมาเล็กน้อยที่อีกด้านหนึ่ง

ภาพที่ 5.20 ให้จัดระนาบของบล๊อกตามเส้นที่ขีดไว้

ภาพที่ 5.21 ตอกลงไปด้วยความแรงพอเหมาะจะได้รอยจุดที่ต้องเจาะ

ภาพที่ 5.22 เจาะรูที่ได้ให้ลึกพอประมาณ

ภาพที่ 5.23 ยึดสกรูเข้ากับแผ่นไม้

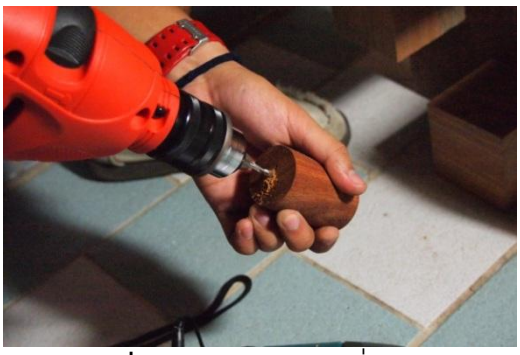


ภาพที่ 5.24 จัดวางบล๊อกไม้ให้พอดีอีกครั้ง

ภาพที่ 5.25 ทำการเจาะรูที่เหลืออีกสามรูพร้อมยึดสกรูให้เรียบร้อย

ภาพที่ 5.26 สภาพเมื่อเสร็จเรียบร้อยยึดสกรูทั้งสี่แล้ว

ภาพที่ 5.27 เจาะรูที่บล๊อกเชื่อมต่อกับท่อกระดาษ



ภาพที่ 5.28 เจาะขยายรูที่เดือยไม้

ภาพที่ 5.29 นำสกรูยึดเข้ากับเดือยโดยไขลงไปจนสุด

ภาพที่ 5.30 สภาพเมื่อกรูเข้าที่ดีแล้ว

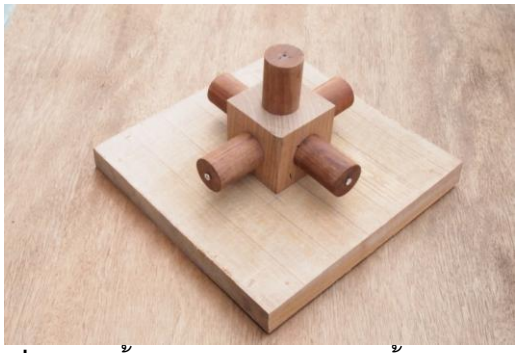
ภาพที่ 5.31 นำไปจุ่มกาวลาเท็กซ์ก่อนติดตั้งเพื่อให้สกรูไม่ลื่นหลุดออกจากบล๊อกไม้

ภาพที่ 5.32 ติดตั้งเดือยเข้ากับบล๊อกไม้โดยใช้มือหมุนเข้าไป

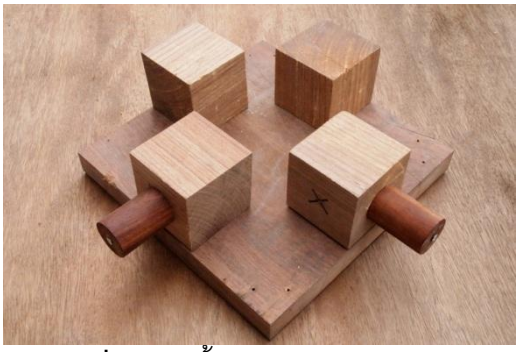
ภาพที่ 5.33 สภาพเมื่อติดตั้งดีแล้ว

ภาพที่ 5.34 บล๊อกไม้ส่วนรับท้องคานโดยใช้ขั้นตอนเดียวกับการประกอบเดือยที่แสดงไว้ก่อนหน้า

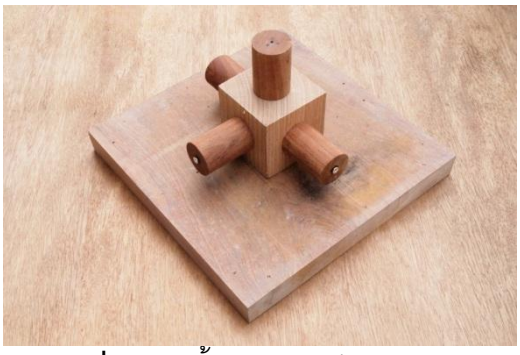
ภาพที่ 5.35 ชิ้นส่วนข้อต่อไม้รับเสาท้องคาน



ภาพที่ 5.36 ชิ้นส่วนข้อต่อไม้แป้นรับพื้นกลางช่วงเสา



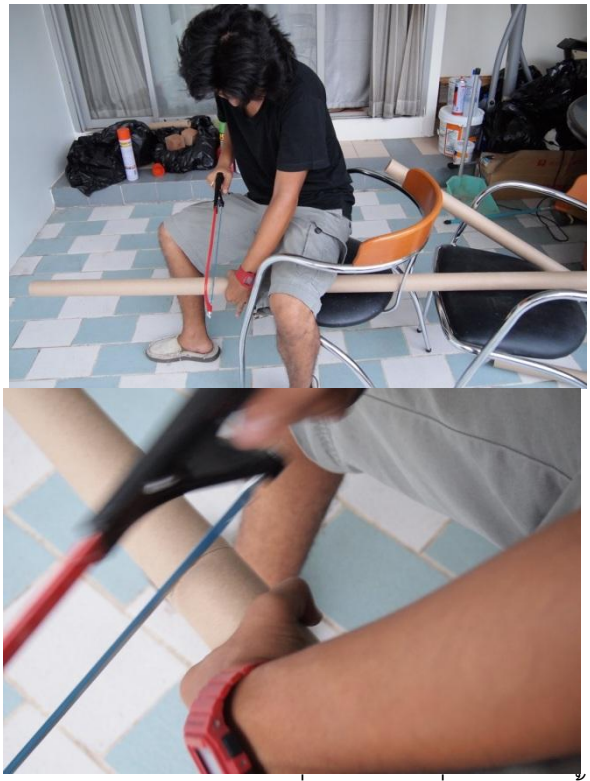
ภาพที่ 5.37 ชิ้นส่วนข้อต่อไม้ปลายเสา



ภาพที่ 5.38 ชิ้นส่วนข้อต่อไม้กลางคาน

ภาพที่ 5.39 จัดวางชิ้นส่วนข้อต่อต่างๆเพื่อง่ายต่อการประกอบ

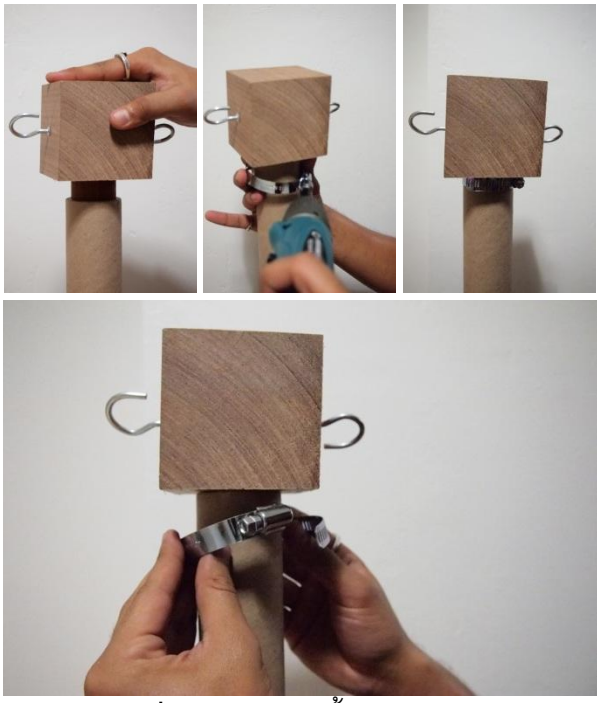
จัดวางชิ้นส่วนข้อต่อต่างๆเพื่อง่ายต่อการประกอบ และเพื่อป้องป้องกันความผิดพลาดจากความคลาดเคลื่อนในภายหลัง



ภาพที่ 5.40 ตัดท่อกระดาษตามความยาวที่กำหนดไว้เพื่อนะไปติดตั้งกับส่วนข้อต่อไม้

ภาพที่ 5.41 การติดตั้งใช้การสวมท่อกระดาษลงไปในเดือยไม้

การติดตั้งใช้การสวมท่อกระดาษลงไปในเดือยไม้ แล้วจึงทำการรัดท่อกระดาษด้วยเข็มขัดรัดท่อ เพราะว่าท่อกระดาษรับเพียงแรงดันจึงทำให้เข็มขัดรัดท่อสามารถยึดท่อกระดาษไว้ได้อย่างแน่นหนาเพียงพอ



ภาพที่ 5.42 การติดตั้งตัวขึงลวดสลิง

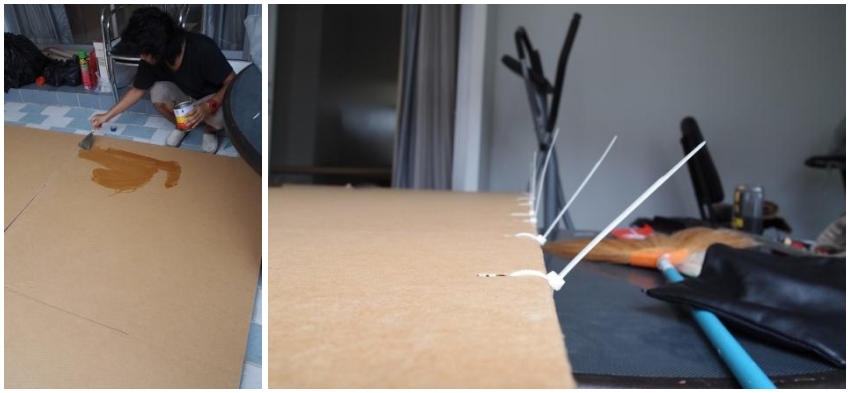
ในส่วนช่วงพาดของคานจะมีเสาลอยซึ่งขึงตึงไว้ด้วยลวดสลิงช่วยดันคานให้ไม่แอ่นตัวตกท้องช้าง

ภาพที่ 5.43 การขึงตึงใช้เกลียวเร่งขันสลิงให้ตึง

ภาพที่ 5.44 สภาพเมื่อขึงตึงโครงสร้างทั้งหมดแล้ว

ภาพที่ 5.45 แผ่นกระดาษลังที่ใช้ทำพื้น

แผ่นพื้นใช้กระดาษลังวางสลับทางกันสี่แผ่นต่อ 1 ชุด เพื่อให้ไม่เกิดการยุบตัวบริเวณกึ่งกลางแผ่นกระดาษลัง



ภาพที่ 5.46 การยึดกระดาษลัง

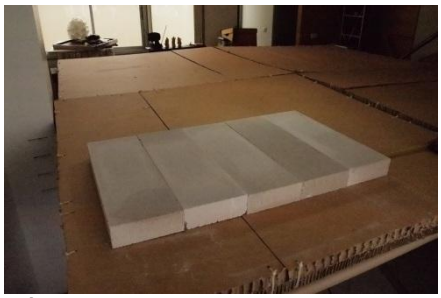
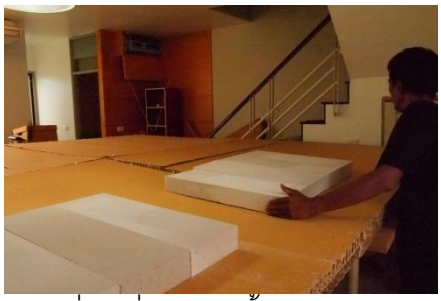
การยึดกระดาษลัง ทากาวยางเพื่อยึดแผ่นกระดาษลังแล้วจึงรัดไว้สายรัดสายไฟรัดอีกครั้ง เพื่อความแน่นหนา

ภาพที่ 5.47 ทำการยกโครงสร้างทั้งหมดให้ลอยขึ้นเพื่อเตรียมบันทึกผล

ภาพที่ 5.48 การปูแผ่นพื้นกระดาษลัง

ภาพที่ 5.49 อิฐมวลเบาที่จะใช้ทดสอบโครงสร้าง

การทดสอบจะใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวทดสอบเพื่อหาน้ำหนักที่โครงสร้างจะสามารถรับได้

ภาพที่ 5.50 ระหว่างการทดสอบค่อยๆเรียงอิฐเพื่อเฉลี่ยการรับน้ำหนักของโครงสร้าง

ภาพที่ 5.51 โครงสร้างพังจากการทดสอบ

โครงสร้างพังลงที่น้ำหนัก 80 กิโลกรัม ด้วยสาเหตุมาจากการที่ขอโลหะที่ ใช้เกี่ยวสลิงไม่สามารถรับแรงดึงได้ จึงง้างออกเป็นผลให้สลิงหลุดออกจากตำแหน่งและโครงสร้างจึงพังลงในที่สุด

ผลการทดลองปรากฏว่า โครงสร้างเกิดการล้มเหลวที่น้ำหนักเพียงไม่เกิน 100 กิโลกรัม ไม่ใช่เพราะว่าท่อกระดาษหรือพื้นกระดาษไม่สามารถรับแรงได้ แต่เกิดจากตะขอซึ่งใช้สำหรับเกี่ยวสลิงขึงตึงนั้นไม่สามารถทานแรงที่เกิดขึ้นจนหลุดออกจากที่ ทำให้โครงสร้างทั้งหมดพังลง การทดลองครั้งที่ 2 จึงตั้งเป้าที่จะมุ่งประเด็นไปที่การถ่ายน้ำหนักของท่อกระดาษเพียงเท่านั้น และปรับปรุงให้ทั้งข้อต่อและพื้นแข็งแรงพอที่จะทดลองได้จนเป็นผลสำเร็จต่อไป

5.1.1 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข การทดลองที่ 1

1.ความล้มเหลวของตะขอโลหะและข้อต่อไม้

ข้อต่อไม้และตะขอโลหะที่ใช้ไม่แข็งแรงพอสำหรับการรับแรงดึงของโครงสร้าง เป็นผลทำให้ทั้งระบบเกิดการวิบัติ เพราะตะขอโลหะได้ง้างออกขณะรับแรงดึง

แนวทางการแก้ไข ปรับเปลี่ยนวัสดุให้แน่นหนายิ่งขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของตะขอโลหะ อาจเลือกใช้วัสดุที่ได้มาตรฐานยิ่งขึ้น หรือเปลี่ยนไปใช้วัสดุชนิดอื่นแทน

การปรับใช้ ในการออกแบบการก่อสร้างของการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 จึงได้เปลี่ยนไปใช้ข้อต่อโลหะและเชื่อมวงแหวนในไปแทนการใช้ตะขอที่ง้างออกได้ ทำให้ข้อต่อมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

2.ความไม่เหมาะสมของสลิง

สลิงขึงนั้นมีความให้ตัวและเกิดการสั่นไหวตลอดเวลาที่ทดลอง ทำให้โครงสร้างไม่มั่นคง มีการถอนและสั่นคลอน ไม่ปลอดภัย

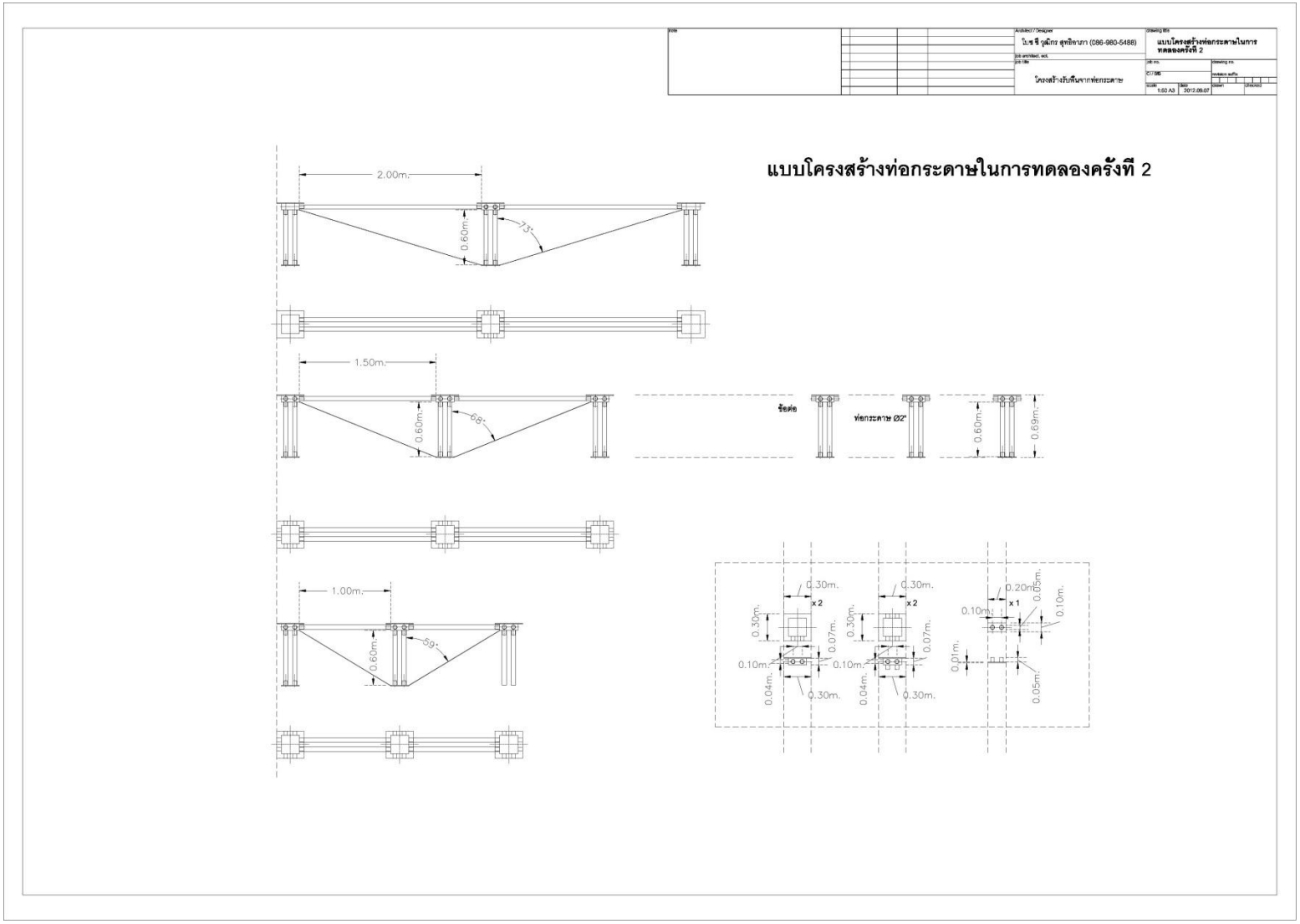
แนวทางการแก้ไข ปรับเปลี่ยนวัสดุให้อยู่ตัวและแน่นหนามากว่าสลิง

การปรับใช้ ในการทดลองครั้งที่ 2 และการทดลองครั้งที 3 นั้นได้เปลี่ยนเอาสลิงขึงเป็นเหล็กเส้นแทน ซึ่งได้ติดตั้งเกลียวเร่งไว้ที่ปลายด้านหนึ่ง ทำให้แข็งแรงขึ้น แน่นหนาและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

5.2 การทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้นครั้งที่ 2

จากความล้มเหลวในการทดลองครั้งที่ 1 จึงทำให้ต้องถอยกลับมาแยกส่วนคานเพื่อพิจารณาพฤติกรรมของการรับน้ำหนักอย่างถี่ถ้วน โดยในการทดลองครั้งที่ 2 นั้น ได้เลือกเอาส่วนคานออกมาพิจารณา และทดลองว่าหากร่นระยะคานเข้ามาเรื่อยๆแล้ว จะสามารถรับน้ำหนักได้เปลี่ยนแปลงมากน้อยอย่างไร

การออกแบบการทดลอง ทำเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคาน ทดสอบชิ้นส่วนข้อต่อที่เป็นโลหะซึ่งถูกนำมาใช้แทนที่ข้อต่อไม้ และพิสูจน์ว่าหากลดระยะคานให้สั้นลงแล้วคานจะสามารถรับน้ำหนักได้ดีขึ้น



ภาพที่ 5.52 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการทดลองที่2

การทดลองเริ่มต้นโดยตัดเอาเพียงส่วนคานรับน้ำหนักมาพิจารณา เริ่มจากความยาว 4 เมตร เป็น 200 เซนติเมตร และเป็น 1 เมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของชุดคานในการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักเมื่อมีความยาวที่สั้นลง

ภาพที่ 5.53 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1.อิฐมวลเบาสำหรับวัดผลการรับน้ำหนัก ขนาด 8.5 กิโลกรัม/ก้อน

2.เหล็กเส้นขึงตึงซึ่งมีเกลียวเร่งสำหรับปรับความตึง

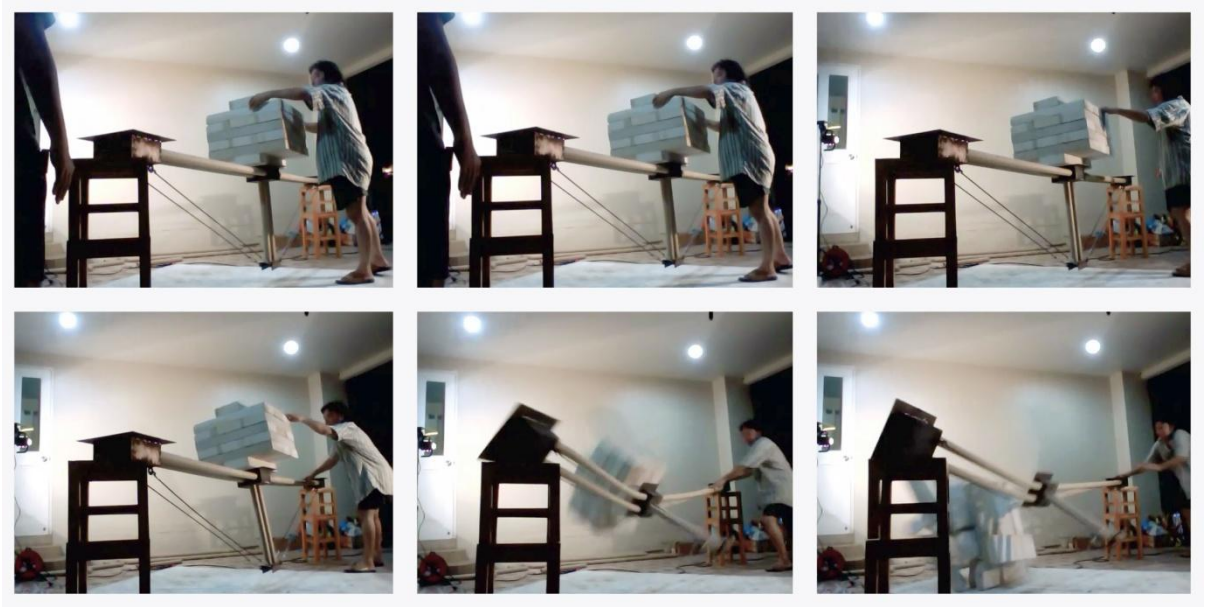
3.ชุดข้อต่อจากการทดลอง5.3

ภาพที่ 5.54 การเตรียมการทดลองการทดลองที่ 2 (1)

ภาพที่ 5.55 การเตรียมการทดลองการทดลองที่ 2 (2)

ภาพที่ 5.56 การทดลองคานขนาด 440 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่ 2 ท่อกระดาษยาวฝั่งละ 200 เซนติเมตร รวมเป็น 440 เซนติเมตร สามารถรับน้ำหนักอิฐมวลเบาได้ 68 กิโลกรัมจึงถึงจุดวิบัติ



ภาพที่ 5.57 การทดลองคานขนาด 340 เซนติเมตร

ภาพที่ 5.58 การทดลองคานขนาด 240 เซนติเมตร

ภาพที่ 5.59 สภาพโครงสร้างหลังจุดวิบัติ

ตารางที่ 5.1 น้ำหนักที่โครงสร้างสามารถรับได้และประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไป

ความยาวของชุดคานท่อกระดาษ (หน่วย : เมตร)	น้ำหนักที่สามารถรับได้ (จนถึงจุดแตกหัก)* (หน่วย : กิโลกรัม)	ประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไป (หน่วย : เปอร์เซนต์)
4	68	-
3	136	100.00
2	221	225.00

*ใช้อิฐมวลเบาเป็นน้ำหนัก 1ก้อน = 8.5 กิโลกรัม เป็นน้ำหนักในการทดลอง

ในการทดลอง แม้จะยังไม่ได้ผลสรุปเกี่ยวกับการรับน้ำหนักสูงสุดที่แน่นอน เนื่องด้วยปัญหาในการที่คานเกิดแรงหมุนขึ้นในขณะรับน้ำหนักจนรับน้ำหนักได้น้อยกว่าความเป็นจริง แต่ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมที่ควรพึงระวัง เช่นการโก่งตัว การหมุน และทราบว่าควรจัดการกับชุดคานท่อกระดาษอย่างไรในการทดลองถัดไปที่จะรวมระบบของคานให้เป็นชุด 440 x 440 เซนติเมตร ในการทดลองครั้งที่ 3

5.2.1 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข การทดลองที่ 2

1.คานบิดตัว

เมื่อคานรับน้ำหนักถึงจุดหนึ่ง การถ่ายแรงจะทำให้คานเกิดการบิดตัว จนทำให้คานไม่สามารถรับน้ำหนักได้มากเท่าที่ควรจะเป็น

แนวทางการแก้ไข เพิ่มการยึดโยงเพื่อหยุดการบิดตัวของคาน โดยในระบบของโครงสร้างพื้นอาจจะใช้วิธียึดโยงไปกับคานในส่วนอื่นๆ

การปรับใช้ นอกจากจะมีการขึงเพื่อเพิ่มระยะการรับน้ำหนักให้กับคาน ยังต้องคำนึงการขึงเพื่อแก้ปัญหาการบิดตัวของคานอีกด้วย

2.การโก่งของคาน

เมื่อคานรับน้ำหนักถึงจุดหนึ่ง แรงที่เกิดขึ้นจะทำให้ท่อกระดาษเกิดการโก่งตัว จนหากท่อกระดาษโก่งตัวมากเกินไปจะทำให้คานหักได้

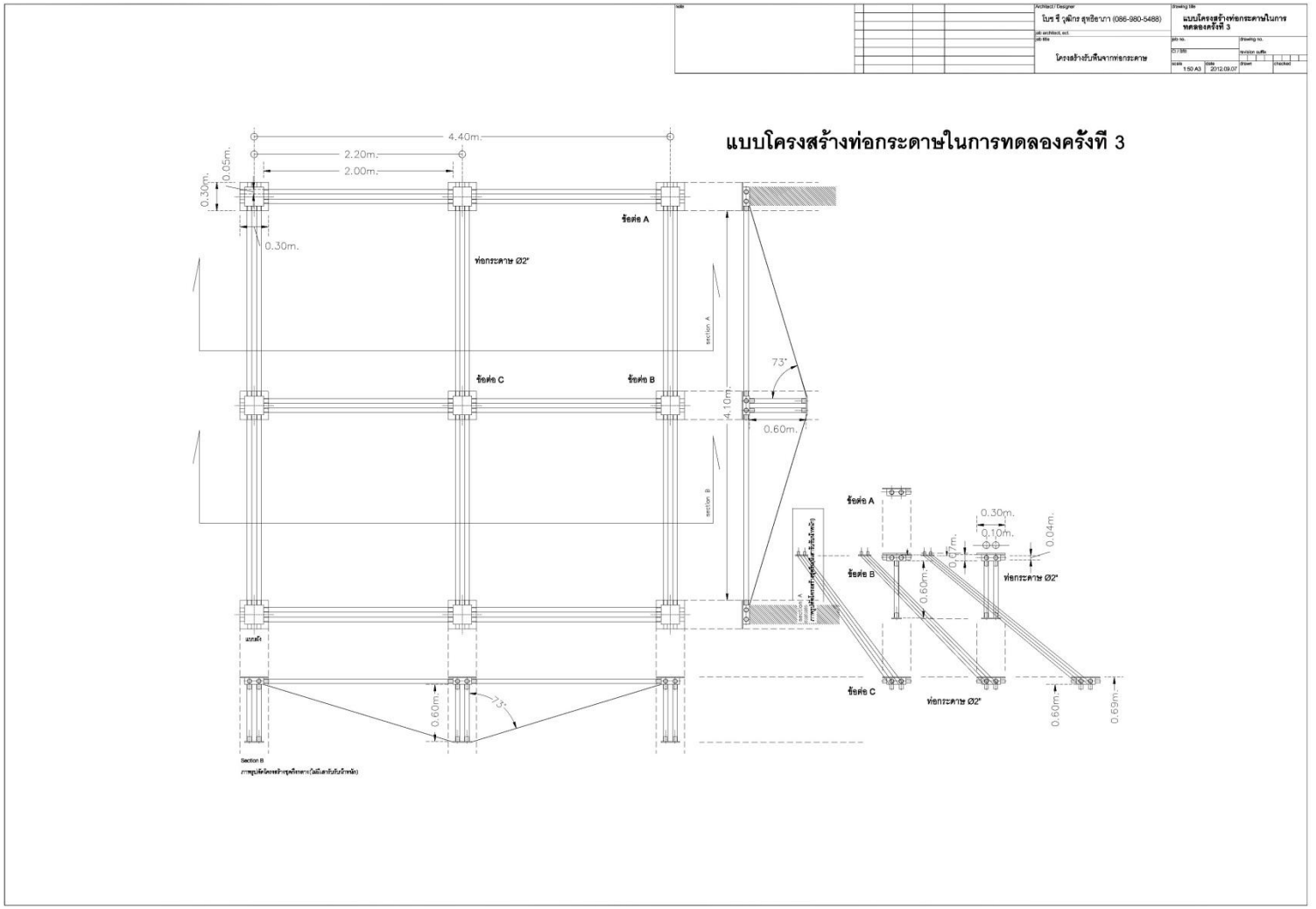
แนวทางการแก้ไข จำเป็นต้องจับให้ท่อกระดาษไม่โก่งตัวและอยู่ในแนวที่จะรับน้ำหนักโดย

การปรับใช้ จับท่อกระดาษรัดเอาไว้ด้วยกัน เป็นการ ค้ำยันเอาไว้ ในการออกแบบใช้ไม้เข้าไปเป็นแผ่นรองแล้วจึงรัดไว้ด้วยเข็มขัดรัดสายไฟ

5.3 การทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้นครั้งที่ 3

ในการทดลองครั้งที่ 3 นั้น เป็นผลจากการเรียนรู้ในข้อผิดพลาดต่างๆของการทดลองทั้งสองครั้งก่อนหน้าในครั้งที่ 3 นี้ผู้วิจัยมีเป้าหมายในการสร้างโครงสร้างรับพื้นที่มีช่วงพาด 440 x440 เซนติเมตร เพื่อทดสอบว่าโครงสร้างจะสามารถรับน้ำหนักได้เท่าไรจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ และนำผลการทดลองไปใช้ในการคำนวณว่าโครงสร้าง 440 x340 เซนติเมตรและ 440 x 240 เซนติเมตร จะสามารถรับน้ำหนักได้เท่าไร เช่นกัน

การทดลองนี้ทำเพื่อที่จะได้ผลการรับน้ำหนักที่จุดวิบัติซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าจะเกิดประโยชน์ต่อไปเมื่อที่ได้รู้ข้อจำกัดของโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษแล้ว การออกแบบโครงสร้างใดๆจากท่อกระดาษจะสามารถทำได้อย่างแม่นยำและปลอดภัยยิ่งขึ้น



ภาพที่ 5.60 แบบ drawingแสดงรูปด้านของโครงสร้างท่อกระดาษในการทดลองที่3

ภาพที่ 5.61 โครงเหล็กกล่องซึ่งใช้เป็นโครงสร้างรับพื้น
สำหรับโครงที่นำมาใช้เป็นพื้นนั้นเป็นโครงเหล็กกล่องสำเร็จรูปมาจากโรงงาน

ภาพที่ 5.62 การจัดวางโครงเหล็ก

เมื่อได้โครงเหล็กแล้ว จึงนำไปวางเรียงในพื้นที่ทดสอบเพื่อทำการตีเส้นบอกแนวการวางโครงสร้างเพื่อ ป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดจากระยะที่ผิดพลาดในการทดสอบ ตีเส้นวางแนวเช็คระยะและระดับของเสารับน้ำหนักให้ดีเสียก่อน

*ข้อสำคัญ คือเสาควรได้ระดับฉากและมีความสูงที่เท่ากัน ไม่เช่นนั้น น้ำหนักอาจจะเทไปข้างใดข้างหนึ่ง ทำให้ผลการทดลองผิดเพี้ยนไปจากที่ควร

ภาพที่ 5.63 การตัดท่อกระดาษและประกอบเป็นท่อตั้ง

ภาพที่ 5.64 ท่อตั้งที่ประกอบสมบูรณ์

ทำการตัดท่อกระดาษตามที่ออกแบบไว้ คือขนาด 60 เซนติเมตร เพื่อใช้ทำท่อตั้ง โดยทำเป็นโครงสร้างประกอบ เมื่อประกอบดีแล้วจึงจับขึ้นแท่นเช็คความสูงให้ดีเพื่อรอประกอบ

ภาพที่ 5.65 การประกอบชุดคาน

เมื่อเตรียมชิ้นส่วนต่าง ๆครบแล้วขั้นตอนต่อมาคือ การนำชิ้นส่วนท่อตั้ง และคนประกอบเข้าด้วยกันในการประกอบชุดคานนั้นจะมีชิ้นส่วนอยู่ 3 ประเภทหลักๆคือ

1. ข้อต่อ เมื่อยึดโครงสร้างทั้งหมดไว้ด้วยกัน
2. ท่อกระดาษ เพื่อรับแรงกด
3. เหล็กเส้น เพื่อรับแรงดึง

ภาพที่ 5.66 ข้อต่อเชื่อมท่อกระดาษกับโครงสร้างเหล็ก

การเชื่อมต่อของท่อกระดาษกับชุดข้อต่อใช้เหล็กรัดท่อเป็นตัวเชื่อมต่อ ส่วนเหล็กเส้นนั้นใช้การเชื่อมเหล็กให้เป็นชิ้นเดียวกัน

ภาพที่ 5.67 ตรวจสอบระดับของโครงสร้างท่อกระดาษ

ตรวจสภาพให้ครบถ้วนว่าไม่มีส่วนใดไม่ได้ระดับมิเช่นนั้นเมื่อวางโครงสร้างพื้นแล้วโครงสร้างจะเทตกไปทางที่ไม่ได้ระดับจนไม่สามารถรับน้ำหนักได้

ภาพที่ 5.68 ส่วนคานรับน้ำหนักของท่อกระดาษ

จัดวางส่วนคานรับพื้นให้เรียบร้อย ตรวจสอบการรับน้ำหนักให้แน่นหนา

ภาพที่ 5.69 การวางไม้อัดบนโครงสร้าง

ทำการวางไม้อัดเพื่อเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกออกให้เท่าๆกันทั่วทั้งโครงสร้าง

ภาพที่ 5.70 วางน้ำหนักบนโครงสร้างท่อกระดาษ

ภาพที่ 5.71 การวัดระยะที่คานตก

เริ่มทำการวางน้ำหนักลง บนโครงสร้างโดยเฉลี่ยจากนอกเข้าด้านใน และทำการวัดระยะที่คานตกลงเมื่อน้ำหนักบรรทุกมาขึ้นเรื่อยๆไปพร้อมกัน

ภาพที่ 5.72 ผลลัพธ์จากการรับน้ำหนักของโครงสร้างท่อกระดาษ

โครงสร้างของคานบริเวณกึ่งกลางได้เกิดการพับตัวลงมาที่น้ำหนัก เป็นอันจบการทดลอง

ผลการทดลองปรากฏว่า โครงสร้างทั้งหมดได้พังลงที่น้ำหนัก 540 กิโลกรัม โดยเป็นผลมาจากการที่ท่อกระดาษได้โก่งออกจากแนวจนไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไปนั่นเอง อย่างไรก็ตามในการเพิ่มขีดความสามารถของการรับน้ำหนักของโครงสร้างท่อกระดาษนั้น สามารถเป็นไปได้จากหลายวิธีการด้วยกัน เช่น เพิ่มขนาดวัสดุ ทั้งท่อ และข้อต่อ แต่ในการทดลองนี้นั้น ได้ยกตัวอย่างขึ้นมาถึงเรื่องวัสดุที่ควรจะเป็นเอาไว้แล้ว การทดลองทั้งสามครั้งนี้จึงมุ่งประเด็นไปในการเพิ่มขีดความสามารถของการรับน้ำหนักของโครงสร้างท่อกระดาษให้มากขึ้น แต่โดยต้องไม่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ ทั้งวัสดุ และขนาดต่างๆของชิ้นส่วนประกอบโครงสร้าง ด้วยเหตุผลข้างต้น จึงได้ข้อสรุปในการทดลองว่าจะปรับความยาวข้างด้านยาวให้สั้นลงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยรวม โดยที่ยังคงด้านยาวไว้ดังเดิม จากกรณีนี้ จะเปรียบเหมือนกับอาคารพาณิชย์ (ตึกแถว) ที่มักจะให้ความสำคัญกับหน้ากว้างเป็นหลักไว้ก่อน จึงคิดว่าหากทดลองแล้วสามารถรับน้ำหนักได้ ก็จะทำให้ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริงของโครงสร้างจากท่อกระดาษนั้นมีความเป็นไปได้ และผลการคำนวณต่างๆจะถูกแสดงไว้ในบทที่ 6 ต่อไป

5.3.1 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข การทดลองที่ 3

1.การเสียระดับ

เมื่อโครงสร้างเริ่มรับน้ำหนัก โครงสร้างทั้งหมดจะเริ่มมีการบิดตัว ซึ่งทำให้ระดับของโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง หากว่าระดับเทไปทางด้านใดด้านหนึ่งมากเกินไปจะทำให้น้ำหนักถูกถ่ายไปทางด้านนั้นมากกว่าส่วนอื่นซึ่งจะเป็นผลให้โครงสร้างรับน้ำหนักได้น้อยกว่าความเป็นจริง

แนวทางการแก้ไข เพิ่มอุปกรณ์ปรับระดับลงไปในระบบโครงสร้างเพื่อแก้ไขระดับในทุกๆการรับน้ำหนัก

การปรับใช้ ในการทดลองได้ใช้วิธีสอดแผ่นเหล็กเพื่อชดเชยระดับที่เปลี่ยนไป แต่ในการปรับใช้จริงแนะนำว่าเพิ่มส่วนปรับระดับที่ชุดข้อต่อเป็นสกรูจะได้ผลที่ดีกว่า

2.การโก่งของคาน

แม้จะมีการประกับไว้ดีแล้ว แต่ในการทดลองที่ 3 ก็ยังมีการโก่งของคานซึ่งเป็นปัญหาหลักในการที่โครงสร้างถึงจุดวิบัติอยู่ดี ซึ่งการโก่งตัวของคานนั้นแปรผันตรงกับน้ำหนักที่โครงสร้างรับไว้นั่นเอง

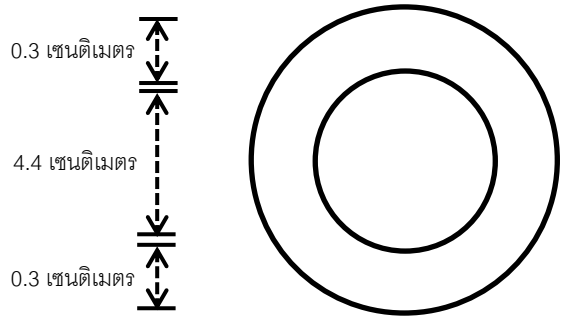
แนวทางการแก้ไข เพิ่มเติมส่วนประกับให้แน่นหนา หรือเพิ่มโครงสร้างลงไปในท่อกระดาษเช่นใช้ไม้ขัดเป็นแกนเพิ่มในท่อกระดาษ

การปรับใช้ อาจมีการเพิ่มความแข็งแรงให้กับท่อกระดาษได้หลากหลายวิธีเช่นเพิ่มไม้เป็นแกนไว้ภายใน กรอกโฟมให้เต็ม หรือกรอกปูนลงไปเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น

บทที่ 6
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 การคำนวณในการทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้นครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 1 นั้นเกิดความวิบัติโดยที่ยังไม่ทันได้เก็บข้อมูล จึงจะขอข้ามไปยังการทดลองที่ 2 เลย ในการทดลองที่ 2 นั้น ได้ใช้ท่อกระดาษและโครงสร้างที่เป็นเหล็ก เพื่อลดปัญหาในการยืดตัวของชิ้นส่วนขึงตึง และได้ทดลองสามครั้งเพื่อเก็บผลในระยะความยาวที่ต่างกัน ทั้งนี้จากการศึกษาพบว่าปัญหาหลักๆของโครงสร้างคานท่อกระดาษคือเมื่อน้ำหนักทิ้งตัวลงบนคานจะเกิดแรงผลักออกด้านข้างและทำให้คานหมุนตัว เมื่อถึงระดับหนึ่งคานจึงไม่สามารถรับน้ำหนักต่อไปได้และทิ้งตัวลง ทั้งนี้ผลการทดลองและค่าการคำนวณต่างๆของการทดลอง 2 ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 6.1 ขนาดของท่อกระดาษที่ใช้ในการทดลอง

พื้นที่หน้าตัดท่อกระดาษ = $A_{ใหญ่} - A_{เล็ก}$

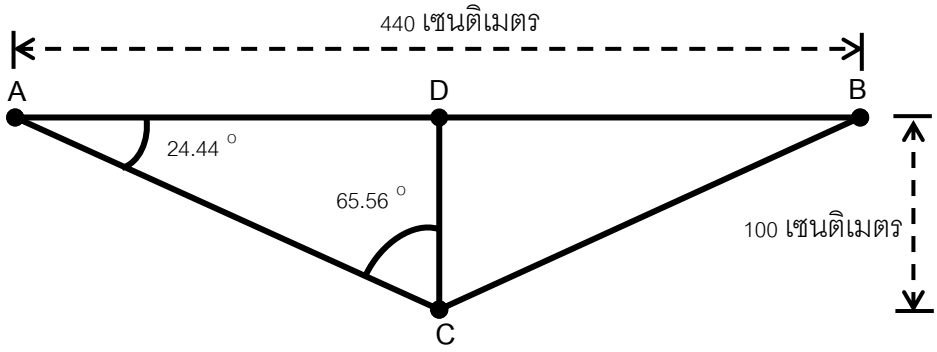
$= \pi R^2 - \pi r^2$

$= \left(\frac{22}{7} \times 2.5^2\right) - \left(\frac{22}{7} \times 2.2^2\right)$

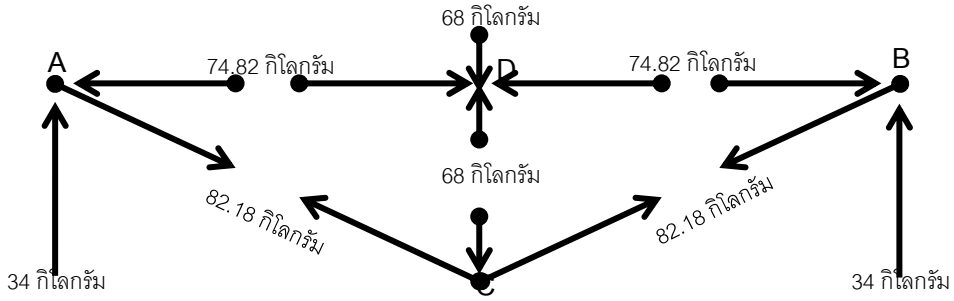
= 4.43 ตารางเซนติเมตร

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดท่อกระดาษ (A) = 4.43 ตารางเซนติเมตร

6.1.1 การคำนวณจากการทดลอง คานขนาด 440 เซนติเมตร



ภาพที่ 6.2 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรในการทดลองที่ 2



ภาพที่ 6.3 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 4.4 เมตรในการทดลองที่ 2

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 24.44^{O} = 34$ กิโลกรัม

$$AC = \frac{34 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 24.44^{O}}$$

$\therefore AC = 82.18$ กิโลกรัม

$AD = AC \cos 24.44^{O}$

$\therefore AD = 74.82$ กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AC และ CB = 82.18 กิโลกรัม

$$\text{Stress } (\rho) = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{82.18 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

$$= 18.55 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

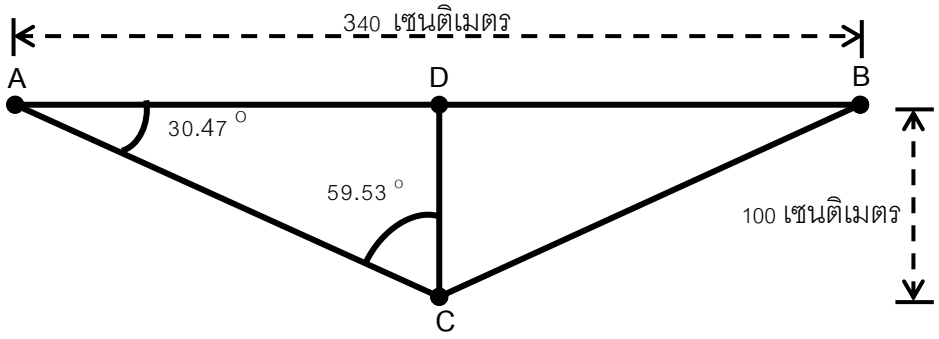
Max compressive = DC = 68 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

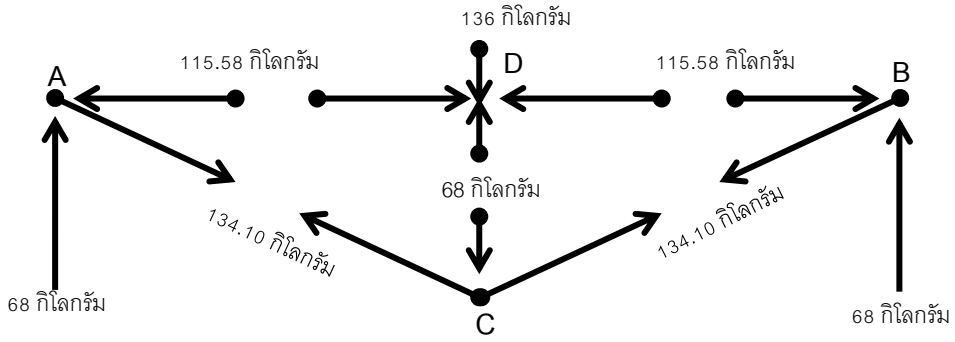
$$= \frac{68 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

$$= 15.35 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

6.1.2 การคำนวณจากการทดลอง คานขนาด 340 เซนติเมตร



ภาพที่ 6.4 ขนาดและองศาของคานความยาว 340 เซนติเมตรในการทดลองที่ 2



ภาพที่ 6.5 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 340 เซนติเมตรในการทดลองที่ 2

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 30.47^{O}$ = 68 กิโลกรัม

$$AC = \frac{68 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 30.47^{O}}$$

$\therefore AC$ = 134.10 กิโลกรัม

$AD = AC \cos 30.47^{O}$

$\therefore AD$ = 115.58 กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AC และ CB = 134.10 กิโลกรัม

และ A = 4.43 ตารางเซนติเมตร

$$\rho = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{134.10 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 30.27 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

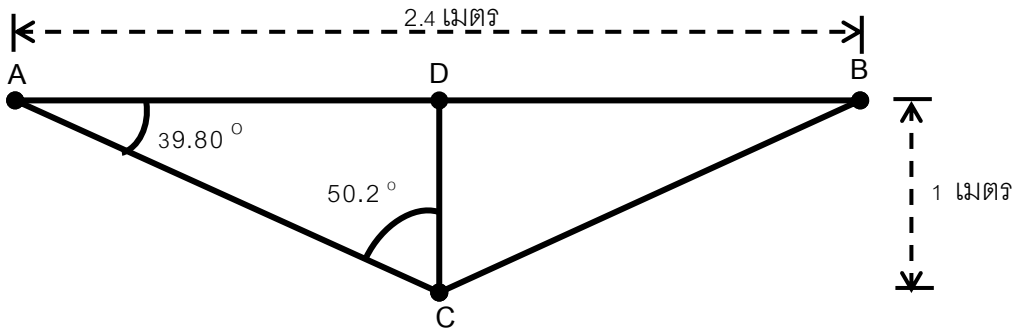
Max compressive = DC = 136 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

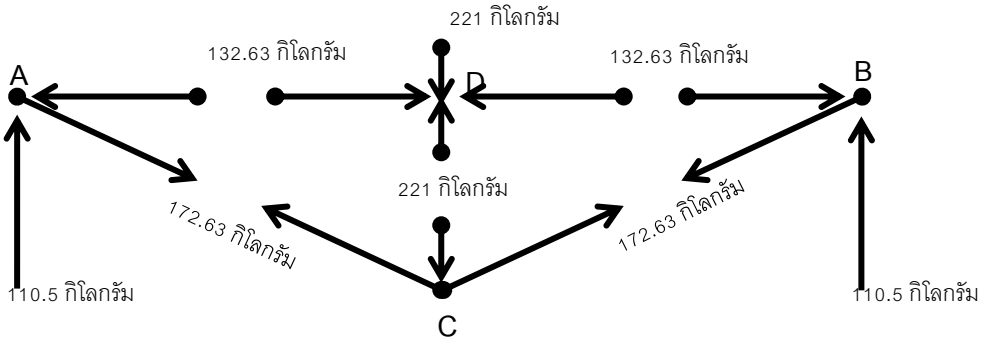
$$= \frac{136 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 30.70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

6.1.3 การคำนวณจากการทดลอง คานขนาด 2.4 เมตร



ภาพที่ 6.6 ขนาดและองศาของคานความยาว 4.4 เมตรในการทดลองที่ 2



ภาพที่ 6.7 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 3.4 เมตรในการทดลองที่ 2

วิธีการคำนวณ

AC sin 39.8^{O} = 110.5 กิโลกรัม

$$AC = \frac{110.5 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 39.8^{o}}$$

$\therefore AC = 172.63$ กิโลกรัม

$AD = AC \cos 39.8^{O}$

$\therefore AD = 132.63$ กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AC และ CB = 172.63 กิโลกรัม

และ A = 4.43 ตารางเซนติเมตร

$$\rho = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{172.63 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 39.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Max compressive = DC = 221 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

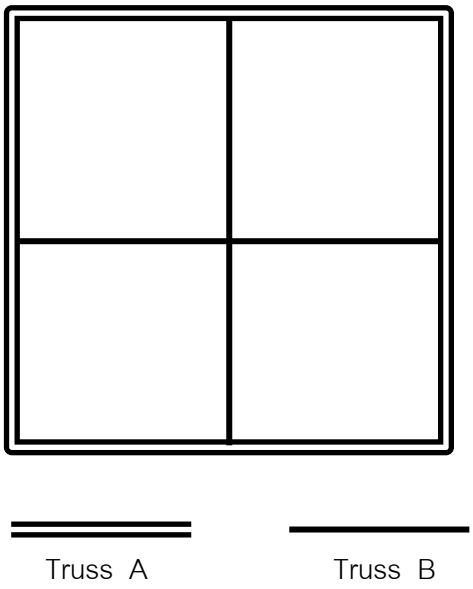
$$= \frac{221 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 49.89 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

6.2 การคำนวณในการทดลองสร้างโครงสร้างท่อกระดาษเพื่อรับพื้นครั้งที่ 3

จากผลการทดลอง ท่อกระดาษนั้นสามารถรับน้ำหนักเฉลี่ยได้ 381.91 กิโลกรัมจึงถึงจุดวิบัติ ซึ่งยังไม่เป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตาม จากแนวคิดในการออกแบบที่ยึดเอาอาคารพาณิชย์มาเป็นตัวอย่าง เมื่อช่วงพาดที่ 440 x 440 เซนติเมตร นั้นใช้ไม่ได้ จึงออกแบบให้ขีดความสามารถในการรับน้ำหนักดีขึ้นโดยการลดช่วงพาดลงในแกนหนึ่งแต่คงระยะ 440 เซนติเมตร ไว้กับช่วงพาดอีกแกนหนึ่งดังนี้คือ 440 x 340 เซนติเมตร และ 440 x 240 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งได้ใช้ผลการทดลองครั้งที่ 3 ในการคำนวณ

เมื่อรวบรวมและทำความเข้าใจต่อปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลองครั้งที่ 2 ทำให้ในการทดลองครั้งที่ 3 นั้นมีการคำนึงถึงการปรับปรุงชุดข้อต่อ การปรับปรุงชุดข้อต่อ การปรับปรุงจุดยึดต่างๆของคานทั้งในส่วนกึ่งกลางคานและบริเวณจุดข้อต่อ ซึ่งจากการทดลองครั้งที่ 3 ที่นำคานมาประกอบเข้าด้วยกันในช่วงพาด 440 x 440 เซนติเมตร กลับทำให้การรับน้ำหนักมีความเสถียรมากกว่าคานเดี่ยว ทั้งนี้ในช่วงพาดที่ 440 x 440 เซนติเมตรนั้น สามารถรับน้ำหนักโดยเฉลี่ยเต็มพื้นที่ได้ทั้งหมด 381.91 กิโลกรัม และมีรายละเอียดผลการทดลองเป็นดังนี้



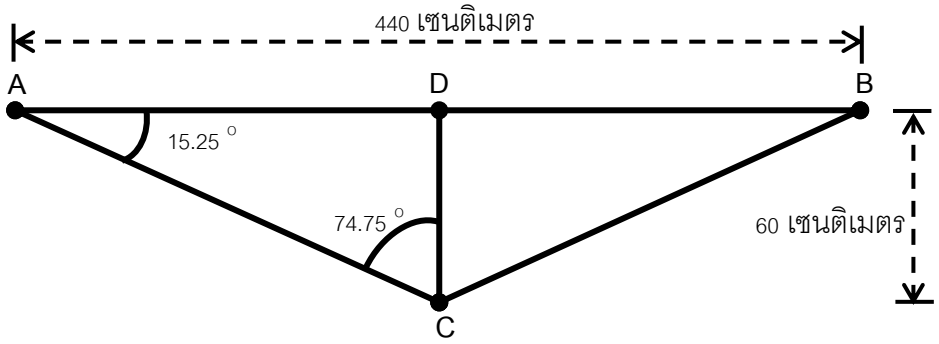
ภาพที่ 6.8 แสดงการแยกส่วนการคำนวณของโครงสร้าง

ดังภาพที่ 6.11 แสดงการแยกส่วนของโครงสร้างโดยการคำนวณจะคิดแยกส่วนโดยรอบนอกจะเรียกว่า Truss A และส่วนรอบในจะเรียกว่า Truss B

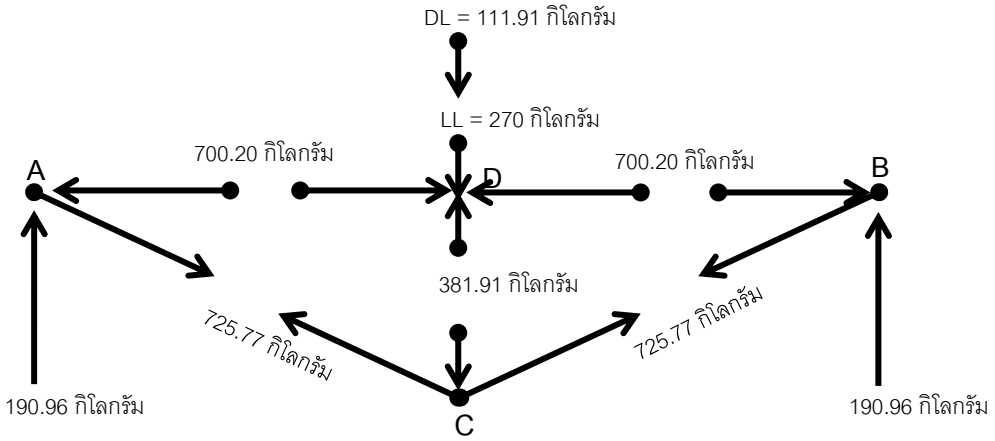
จากการทดลองครั้งที่ 3 จะแยกการคำนวณออกเป็น 2 ส่วนคือ Truss A และ Truss B สามารถคำนวณหาค่า Stress ได้ดังนี้

6.2.1 **การคำนวณการทดลองทั้งชุดระบบขนาด 440 x 440 เซนติเมตร** ซึ่งในการทดลองสามารถรับน้ำหนักได้ถึง 381.91 กิโลกรัม แสดงการคำนวณในส่วนของ Truss B และ Truss A ตามลำดับ

6.2.1.1 การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss B



ภาพที่ 6.9 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss B ในการทดลองที่3



ภาพที่ 6.10 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss B ในการทดลองที่ 3

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 15.25^{O} = 190.96$ กิโลกรัม

$$AC = \frac{190.96 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 15.25^{O}}$$

$\therefore AC = 725.77$ กิโลกรัม

$AD = AC \cos 15.25^{O}$

$\therefore$ AD = 700.20 กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AD และ DB = 700.20 กิโลกรัม

$$\text{Stress } (\rho) = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{700.20 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

$$= 158.06 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

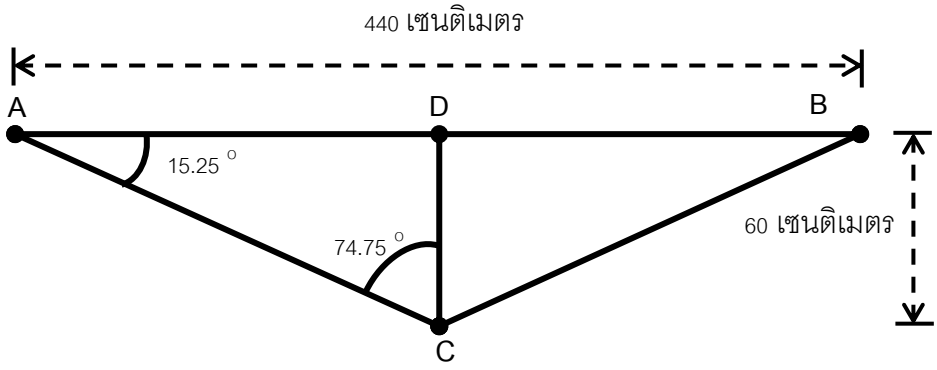
Max compressive = DC = 381.91 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

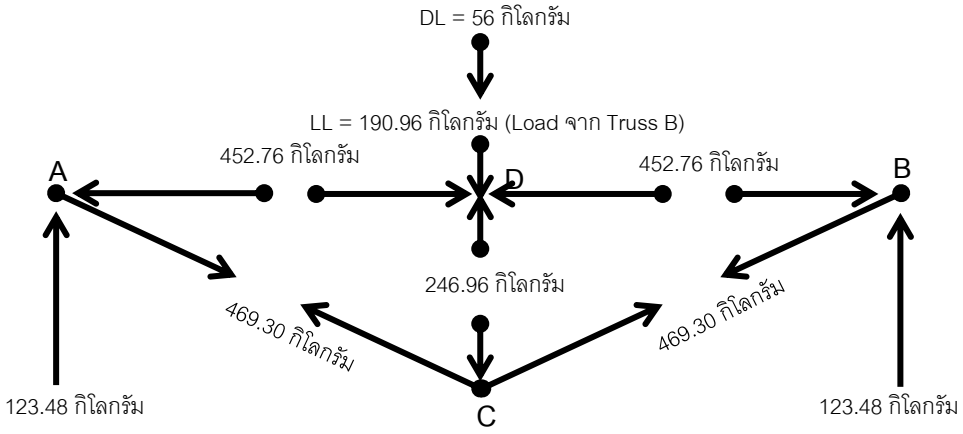
$$= \frac{381.91 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

$$= 86.21 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

6.2.1.2 การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss A



ภาพที่ 6.11 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss A ในการทดลองที่ 3



ภาพที่ 6.12 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss A ในการทดลองที่ 3

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 15.25^{O}$ = 123.48 กิโลกรัม

$$AC = \frac{123.48 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 15.25^{O}}$$

$\therefore AC$ = 469.30 กิโลกรัม

$AD = AC \cos 15.25^{O}$

$\therefore AD$ = 452.76 กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AD และ DB = 452.76 กิโลกรัม

$$\text{Stress } (\rho) = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{452.76 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 102.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Max compressive = DC = 246.96 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{246.96 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 55.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

6.2.2 **การคำนวณหา Stress และแรงที่โครงสร้างจะรับได้ของชุดระบบขนาด 440 x340 เซนติเมตร** การคำนวณในส่วนนี้เพื่อพยากรความสามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างแสดงดังนี้

จะแสดงการคำนวณตามลำดับ ดังนี้

-การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss B ของคานขนาด 340 เซนติเมตร

- การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss A ของคานขนาด 340 เซนติเมตร

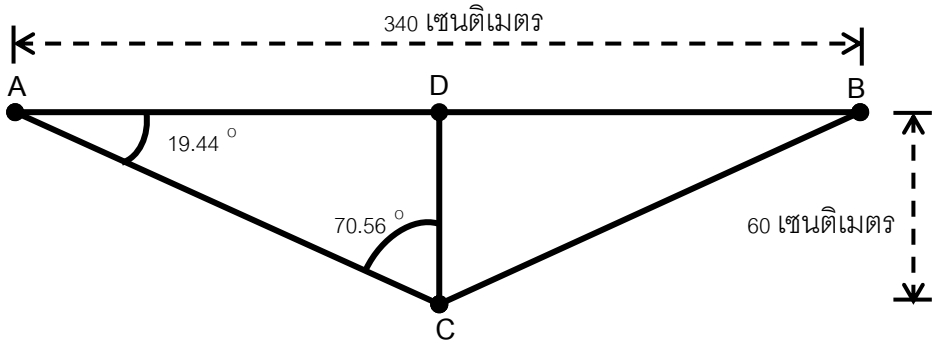
-การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss B ของคานขนาด 440 เซนติเมตร

- การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss A ของคานขนาด 440 เซนติเมตร

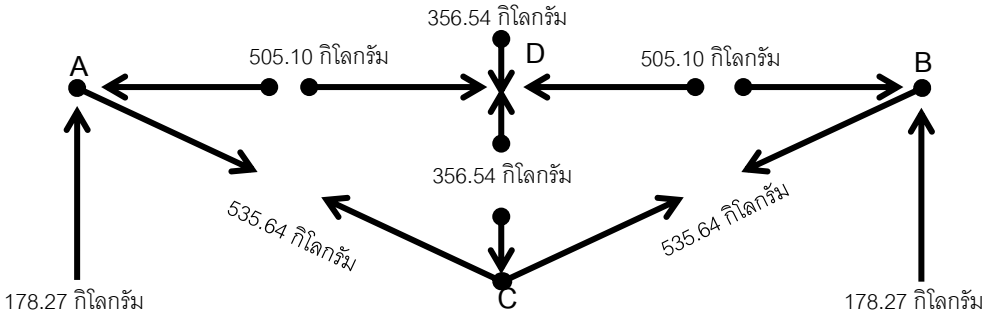
- การคำนวณค่าแรงที่คานขนาด 340 เซนติเมตรสามารถรับได้

- การคำนวณค่าแรงที่คานขนาด 440 เซนติเมตรสามารถรับได้

6.2.2.1 **การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss B ของคานขนาด 3.4 เมตร**



ภาพที่ 6.13 ขนาดและองศาของคานความยาว 3.4 เมตรส่วนของ Truss B



ภาพที่ 6.14 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 340 เซนติเมตรส่วนของ Truss B จากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 19.44^{O} = 178.27$ กิโลกรัม

$$AC = \frac{178.27 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 19.44^{O}}$$

$\therefore AC = 535.64$ กิโลกรัม

$AD = AC \cos 19.44^{O}$

$\therefore AD = 505.10$ กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AD และ DB = 505.10 กิโลกรัม

$$\text{Stress } (\rho) = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{505.10 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 114.01 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

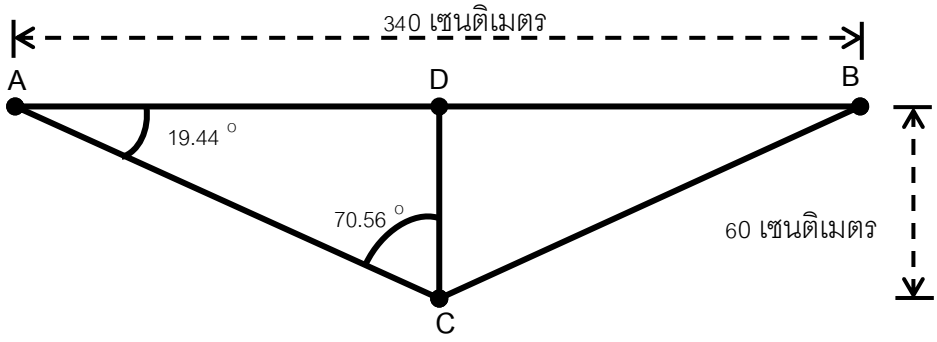
Max compressive = DC = 356.54 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

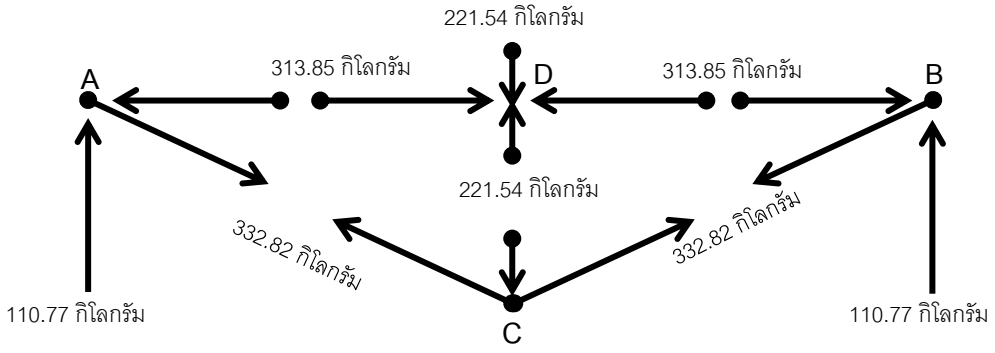
$$= \frac{356.54 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

$$= 80.48 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

6.2.2.2 การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ TrussA ของคานขนาด 340 เซนติเมตร



ภาพที่ 6.15 ขนาดและองศาของคานความยาว 340 เซนติเมตรส่วนของ Truss A



ภาพที่ 6.16 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 3.4 เมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

AC sin 19.44^{O} = 110.77 กิโลกรัม

$$AC = \frac{110.77 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 19.44^{o}}$$

$\therefore AC = 332.82$ กิโลกรัม

$AD = AC \cos 19.44^{O}$

$\therefore AD = 313.85$ กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AD และ DB = 313.85 กิโลกรัม

$$\text{Stress } (\rho) = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{313.85 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 70.85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

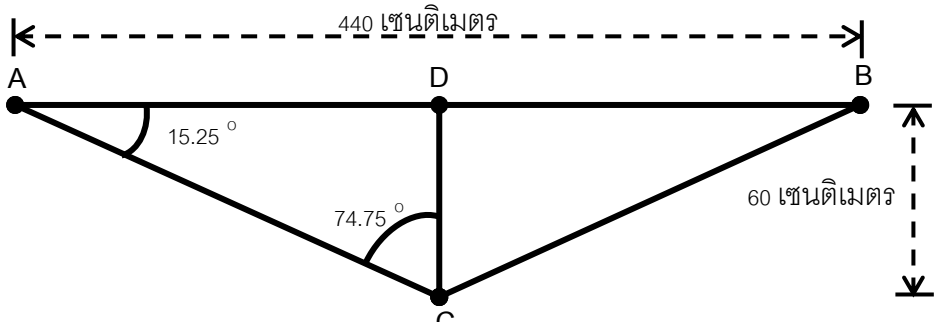
Max compressive = DC = 221.54 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

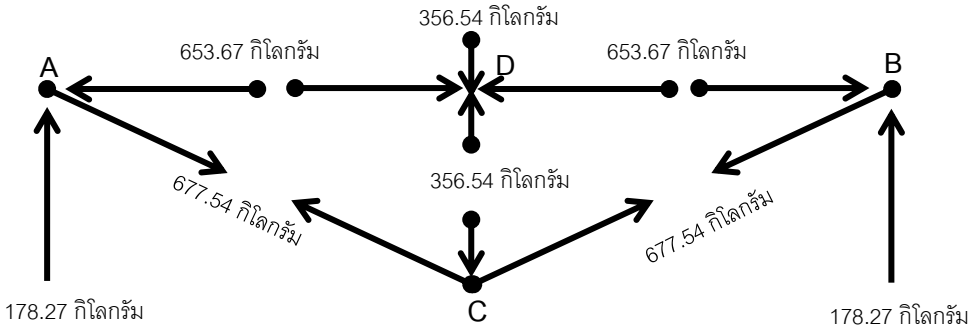
$$= \frac{221.54 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 50.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

6.2.2.3 การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ TrussB ของคานขนาด 440 เซนติเมตร



ภาพที่ 6.17 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss B



ภาพที่ 6.18 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss B จากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 15.25^{O}$ = 178.27 กิโลกรัม

$$AC = \frac{178.27 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 15.25^{O}}$$

$\therefore AC$ = 677.54 กิโลกรัม

AD = $AC \cos 15.25^{O}$

$\therefore AD$ = 653.67 กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AD และ DB = 653.67 กิโลกรัม

$$\text{Stress } (\rho) = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{653.67 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 147.55 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

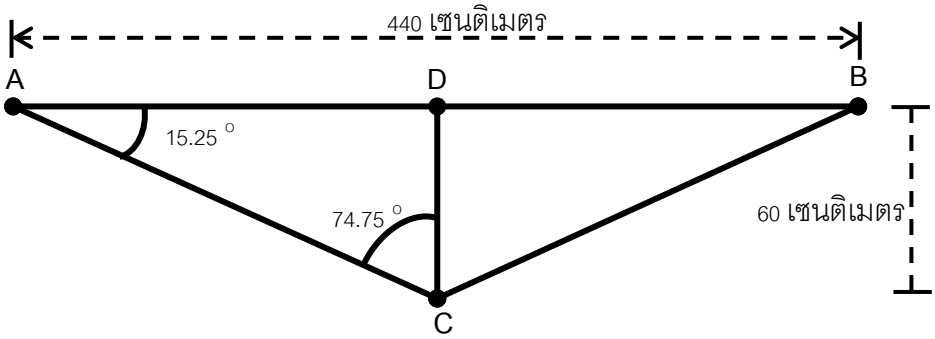
Max compressive = DC = 356.54 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

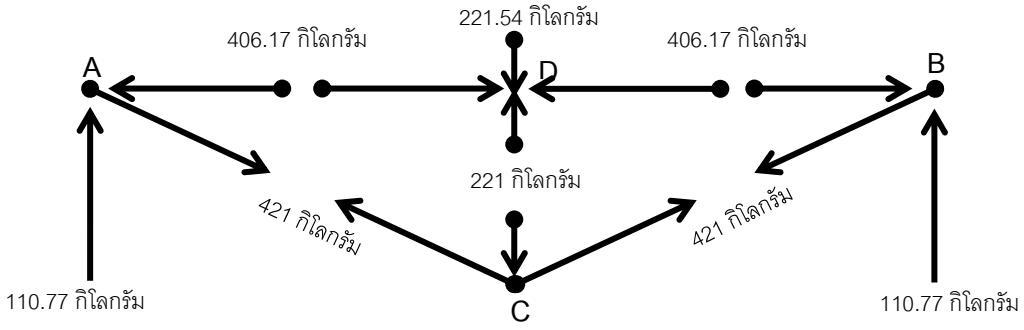
$$= \frac{356.54 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

$$= 80.48 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

6.2.2.4 การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ TrussA ของคานขนาด 440 เซนติเมตร



ภาพที่ 6.19 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss A



ภาพที่ 6.20 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

$$AC \sin 15.25^{O} = 110.77 \text{ กิโลกรัม}$$

$$AC = \frac{110.77 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 15.25^{O}}$$

$\therefore$ AC = 421 กิโลกรัม

AD = AC cos 15.25^{O}

$\therefore$ AD = 406.17 กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AD และ DB = 406.17 กิโลกรัม

$$\text{Stress } (\rho) = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{406.17 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 91.68 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

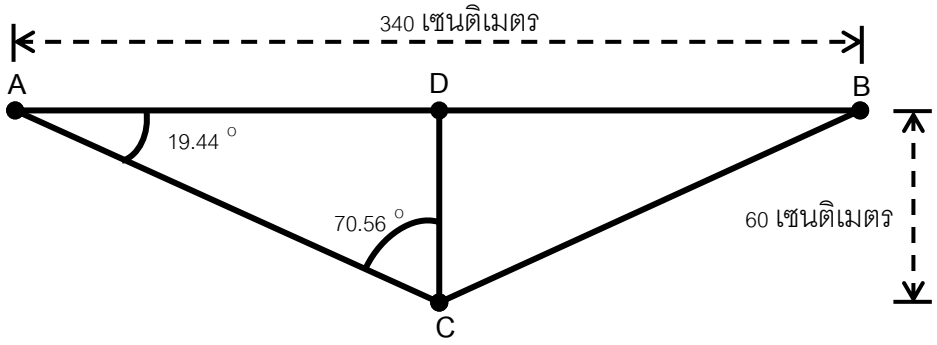
Max compressive = DC = 221.54 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

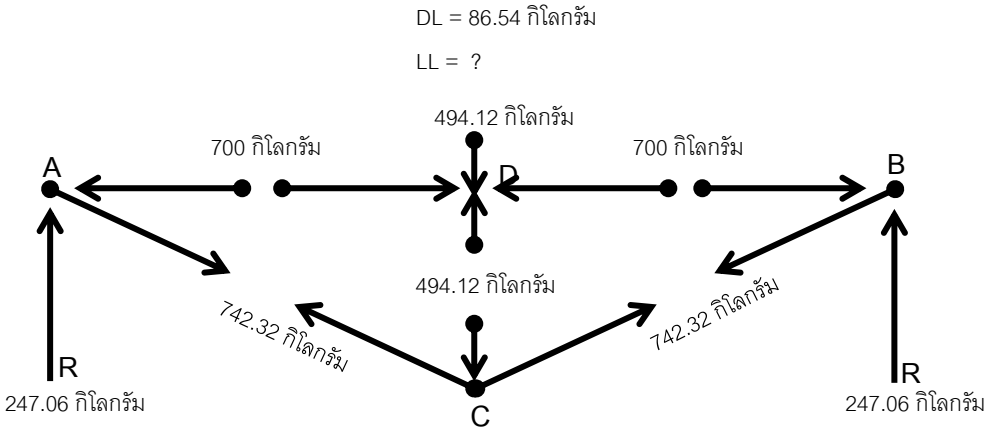
$$= \frac{221.54 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 50.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

6.2.2.5 **การคำนวณค่าแรงที่ส่วนของ** Truss B **ของคานขนาด 340 เซนติเมตร สามารถรับได้**



ภาพที่ 6.21 ขนาดและองศาของคานความยาว 340 เซนติเมตรส่วนของ Truss B



ภาพที่ 6.22 น้ำหนักบรรทุกจรที่ที่รับได้ในแนวแกนของคานความยาว 340 เซนติเมตรส่วนของ Truss B จากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 19.44^{O}$ = 700 กิโลกรัม

$$AC = \frac{700 \text{ กิโลกรัม}}{\cos 19.44^{O}}$$

∴ AC = 742.32 กิโลกรัม

RA = $AC \sin 19.44^{O}$

∴ RA = 247.06 กิโลกรัม

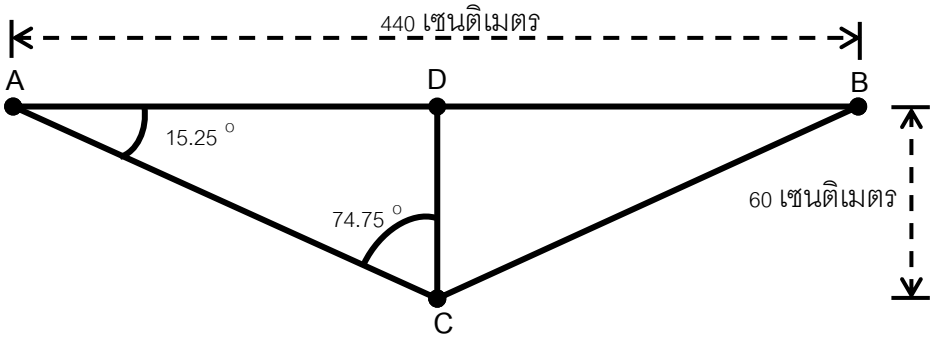
(DL+LL) = (RA+RB)

(86.54+LL) = 247.06+247.06

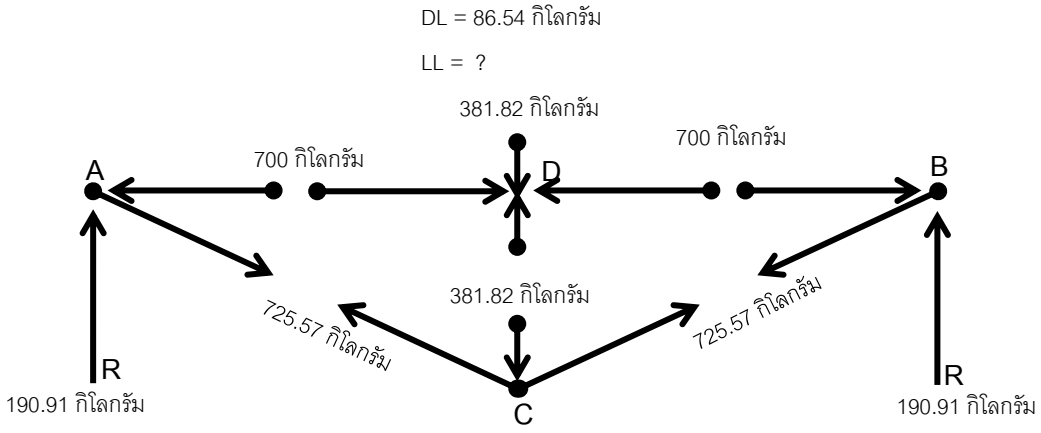
LL = 247.06+247.06-86.54

LL = 407.58 กิโลกรัม

6.2.2.6 การคำนวณค่าแรงที่ส่วนของ Truss A ของคานขนาด 440 เซนติเมตร สามารถรับได้



ภาพที่ 6.23 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss A



ภาพที่ 6.24 น้ำหนักบรรทุกจรที่ที่รับได้ในแนวแกนของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 15.25^{O} = 700$ กิโลกรัม

$$AC = \frac{700 \text{ กิโลกรัม}}{\cos 15.25^{O}}$$

$\therefore AC = 725.57$ กิโลกรัม

RA = AC sin 15.25^{O}

∴ RA = 190.91 กิโลกรัม

(DL+LL) = (RA+RB)

(86.54+LL) = 190.91+190.91

LL = 190.91+190.91-86.54

LL = 295.28 กิโลกรัม

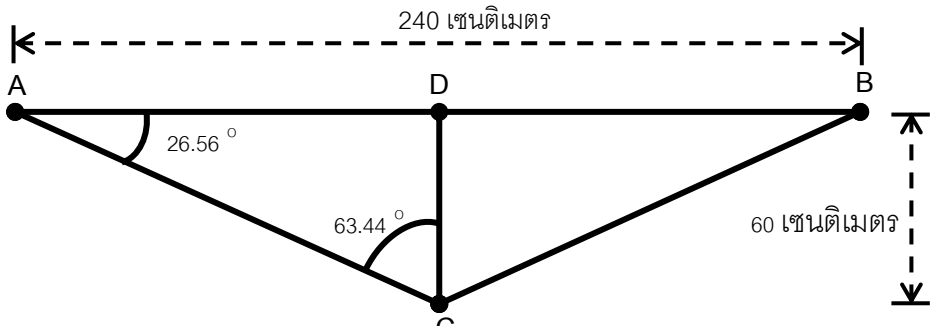
∴ ในระบบพิกัด 440 x 340 เซนติเมตรนั้น โครงสร้างจะสามารถรับน้ำหนัก ณ จุดใดๆก็ตามได้ 295.28 กิโลกรัม ซึ่งเป็นระยะปลอดภัย แต่จะสามารถรับเฉลี่ยเต็มพื้นที่ได้ถึง 351.41 กิโลกรัมซึ่งเป็นระยะปลอดภัย และ รับน้ำหนักเฉลี่ยเต็มพื้นที่ได้ 702.86 กิโลกรัม จึงจะถึงจุดวิบัติ

6.2.3 การคำนวณหา Stress และแรงที่โครงสร้างจะรับได้ของชุดระบบขนาด 440x240 เซนติเมตร การคำนวณในส่วนนี้เพื่อพยากรความสามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างแสดงดังนี้

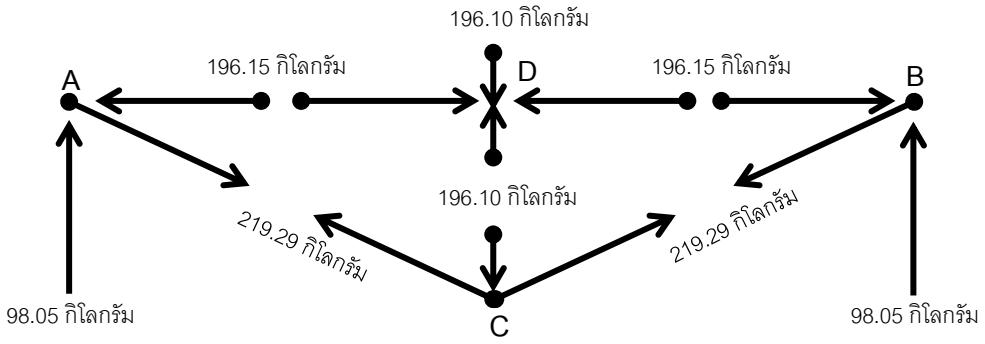
จะแสดงการคำนวณตามลำดับ ดังนี้

- การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss A ของคานขนาด 240 เซนติเมตร
-การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss B ของคานขนาด 440 เซนติเมตร
- การคำนวณค่าแรงที่คานขนาด 240 เซนติเมตรสามารถรับได้
- การคำนวณค่าแรงที่คานขนาด 440 เซนติเมตรสามารถรับได้

6.2.3.1 การคำนวณค่า Stressในส่วนของ Truss A ของคานขนาด 240 เซนติเมตร



ภาพที่ 6.25 ขนาดและองศาของคานความยาว 240 เซนติเมตรส่วนของ Truss A



ภาพที่ 6.26 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 240 เซนติเมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 26.56^{O} = 98.05$ กิโลกรัม

$$AC = \frac{98.05 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 26.56^{O}}$$

$\therefore AC = 219.29$ กิโลกรัม

$AD = AC \cos 26.56^{O}$

$\therefore AD = 196.15$ กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AD และ DB = 196.15 กิโลกรัม

$$\text{Stress } (\rho) = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{196.15 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

$= 44.27$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

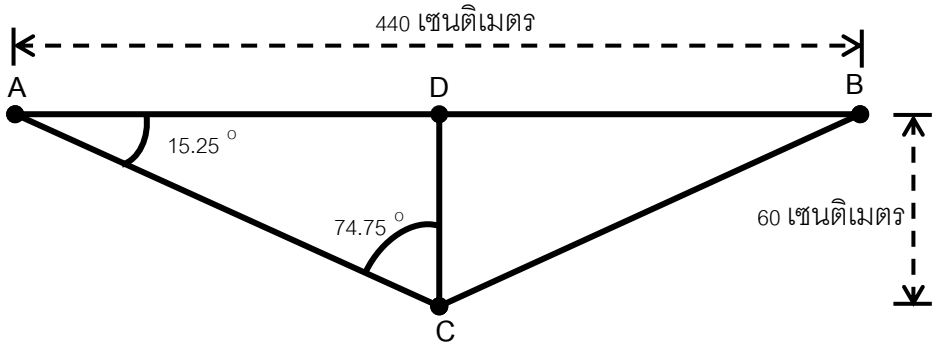
Max compressive = DC = 196.10 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

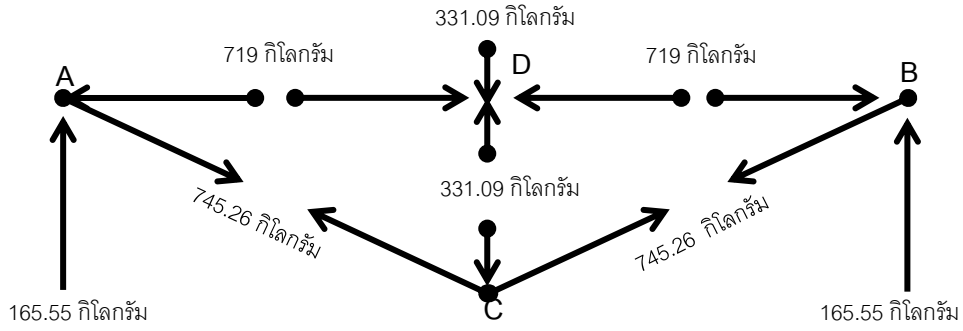
$$= \frac{196.10 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเซน}}$$

$$= 44.26 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

6.2.3.2 การคำนวณค่า Stress ในส่วนของ Truss B ของคานขนาด 440 เซนติเมตร



ภาพที่ 6.27 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss B



ภาพที่ 6.28 แรงที่รับน้ำหนักได้แต่ละแนวแกนของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss B จากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 15.25^{O} = 165.55 \text{ กิโลกรัม}$

$$AC = \frac{165.55 \text{ กิโลกรัม}}{\sin 15.25^{O}}$$

$\therefore$ AC = 607.02 กิโลกรัม

AD = AC cos 15.25^{O}

$\therefore$ AD = 607.02 กิโลกรัม

ดังนั้น Max Tensile คือ AD และ DB = 607.02 กิโลกรัม

$$\text{Stress } (\rho) = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{607.02 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 137.02 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

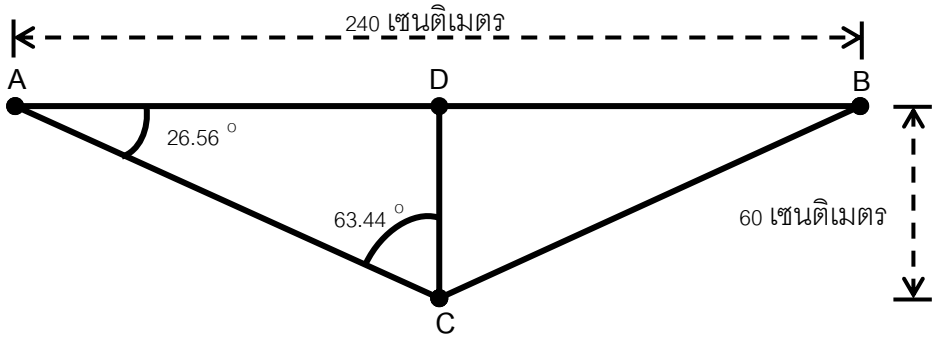
Max compressive = DC = 331.09 กิโลกรัม

$$\rho = \frac{P}{A}$$

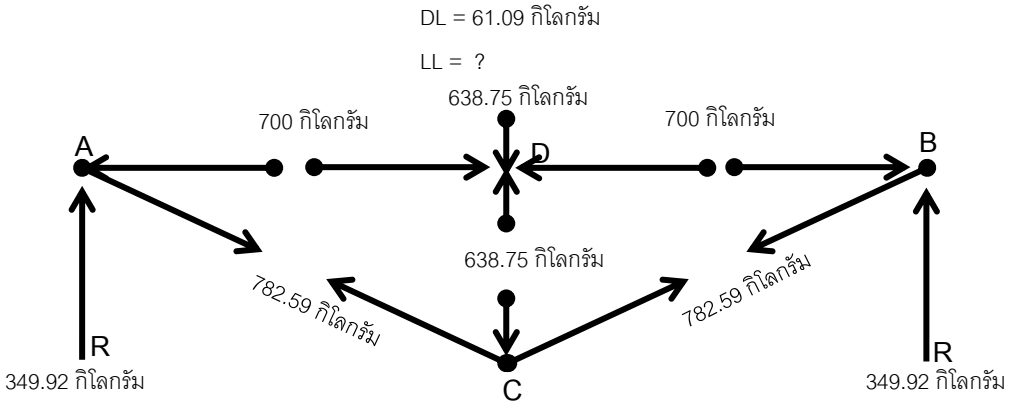
$$= \frac{331.09 \text{ กิโลกรัม}}{4.43 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$$

= 74.73 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

6.2.3.3 การคำนวณค่าแรงที่ส่วนของ Truss A ของคานขนาด 240 เซนติเมตร สามารถรับได้



ภาพที่ 6.29 ขนาดและองศาของคานความยาว 240 เซนติเมตรส่วนของ Truss A



ภาพที่ 6.30 น้ำหนักบรรทุกจรที่ที่รับได้ในแนวแกนของคานความยาว 240 เซนติเมตรส่วนของ Truss A จากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 26.66^{O} = 700$ กิโลกรัม

$$AC = \frac{700 \text{ กิโลกรัม}}{\cos 26.66^{O}}$$

$\therefore AC = 782.59$ กิโลกรัม

$RA = AC \sin 26.56^{O}$

$\therefore RA = 349.92$ กิโลกรัม

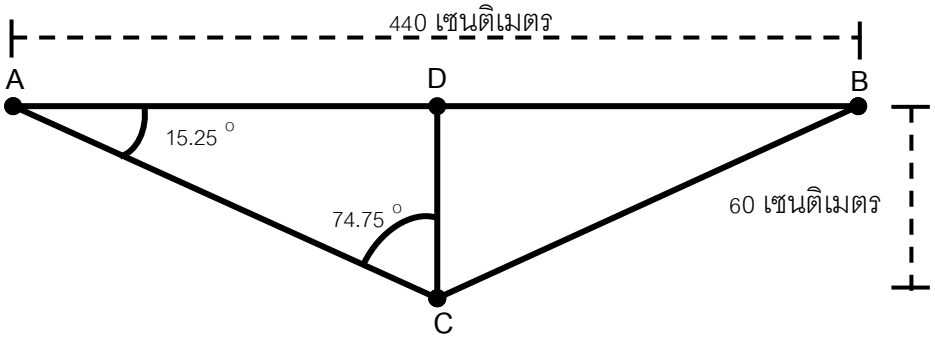
$(DL+LL) = (RA+RB)$

$(61.09+LL) = 349.92 + 349.92$

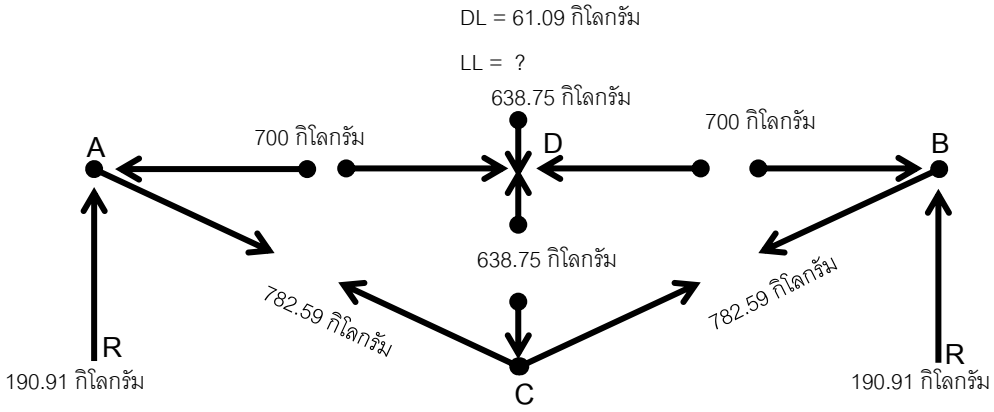
$LL = 349.92 + 349.92-61.09$

$LL = 638.75$ กิโลกรัม

6.2.3.4 การคำนวณค่าแรงที่คานขนาด 440 เซนติเมตรสามารถรับได้



ภาพที่ 6.31 ขนาดและองศาของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss B



ภาพที่ 6.32 น้ำหนักบรรทุกจรที่ที่รับได้ในแนวแกนของคานความยาว 440 เซนติเมตรส่วนของ Truss Bจากการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

$AC \sin 15.25^{O} = 700$ กิโลกรัม

$$AC = \frac{700 \text{ กิโลกรัม}}{\cos 15.25^{O}}$$

$\therefore AC = 725.57$ กิโลกรัม

RA = AC sin 15.25^{O}

∴ RA = 190.91 กิโลกรัม

(DL+LL) = (RA+RB)

(61.09+LL) = 190.91+190.91

LL = 190.91+190.91-61.09

LL = 320.73 กิโลกรัม

∴ ในระบบพิกัด 440 x 340 เซนติเมตรนั้น โครงสร้างจะสามารถรับน้ำหนัก ณ จุดใดๆก็ตามได้ 320.73 กิโลกรัม ซึ่งเป็นระยะปลอดภัย แต่จะสามารถรับเฉลี่ยเต็มพื้นที่ได้ถึง 479.74 กิโลกรัมซึ่งเป็นระยะปลอดภัย และ รับน้ำหนักเฉลี่ยเต็มพื้นที่ได้ 959.48 กิโลกรัม จึงจะถึงจุดวิบัติ

6.3 อภิปรายผล

ในการทดลองครั้งที่ 1 นั้น โครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษไม่สามารถคงตัวอยู่ได้เป็นเพราะระบบข้อต่อที่ด้อยประสิทธิภาพทำให้ขอเกี่ยวสลิงขึงตึงนั้นเกิดความผิดพลาดและทั้งระบบจึงพังลงมา

ต่อมาในการทดลองครั้งที่ 2 จึงได้นำเอาเฉพาะส่วนคานมาพิจารณาโดยทำการทดลองย่อยสามครั้งคือ ช่วงพาด 440 เซนติเมตร 340 เซนติเมตร และ 230 เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งแม้จะได้ผลการรับน้ำหนักยังไม่เป็นที่น่าพอใจนัก แต่จากการทดลองทำให้ทราบถึงพฤติกรรมและข้อควรระวังในการออกแบบโครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษต่อไป ซึ่งข้อผิดพลาดหลักๆของการทดลองครั้งที่ 2 ก็คือการที่เมื่อมีน้ำหนักกดลงบนคานจะทำให้เกิดแรงที่ทำให้คานนั้นหมุนตามแนวแกน จนเมื่อน้ำหนักกดลงมามากจนเกินไป คานจะล้มลงเป็นผลทำให้โครงสร้างไม่สามารถคงอยู่ได้

สุดท้ายในการทดลองครั้งที่ 3 ด้วยช่วงขนาด 440 x 440 เซนติเมตร โครงสร้างท่อกระดาษสามารถรับน้ำหนักได้ 381.91 กิโลกรัมจึงถึงจุดวิบัติโดยในการทดลองนั้นโครงสร้างเกิดพังลงมาเพราะการโก่งของตัวท่อกระดาษจนเกินออกไปจากแนวแกนมากไป ระบบโครงถักจึงไม่สามารถทำงานได้เต็มที่ โครงสร้างจึงเกิดการวิบัติ แต่จากการคำนวณเมื่อลดช่วงพาดเป็น 440 x 340 เซนติเมตร กลับได้ผลที่ดีขึ้น คือรับน้ำหนักได้ 702.86 กิโลกรัม จึงถึงจุดวิบัติและเมื่อลดขนาดเป็น 440 x 240 เซนติเมตร ท่อกระดาษสามารถรับน้ำหนักได้ 959.48 กิโลกรัม จึงถึงจุดวิบัติซึ่งได้ผล

การคำนวณเป็นที่น่าพอใจ ระยะ 440 เซนติเมตร นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ไม่ต่างไปจากช่วงพิกัดของอาคารพาณิชย์ทั่วๆไปนัก และระยะ 240 เซนติเมตรนั้น ก็เพียงพอต่อการใช้งานเป็นผนังหรือประตูได้อีกด้วย หากว่าพัฒนาต่อไป โครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษจะสามารถกลายเป็นวัสดุทางเลือกได้อย่างแน่นอน

6.3.1 ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา

- ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหาจากการทดลองที่ 1

1. ความล้มเหลวของตะขอโลหะและข้อต่อไม้

ข้อต่อไม้และตะขอโลหะที่ใช้ไม่แข็งแรงพอสำหรับการรับแรงดึงของโครงสร้าง เป็นผลทำให้ทั้งระบบเกิดการวิบัติ เพราะตะขอโลหะได้ง้างออกขณะรับแรงดึง

แนวทางการแก้ไข ปรับเปลี่ยนวัสดุให้แน่นหนายิ่งขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของตะขอโลหะ อาจเลือกใช้วัสดุที่ได้มาตรฐานยิ่งขึ้น หรือเปลี่ยนไปใช้วัสดุชนิดอื่นแทน

การปรับใช้ ในการออกแบบการก่อสร้างของการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 จึงได้เปลี่ยนไปใช้ข้อต่อโลหะและเชื่อมวงแหวนในไปแทนการใช้ตะขอที่ง้างออกได้ ทำให้ข้อต่อมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

2. ความไม่เหมาะสมของสลิง

สลิงขึงนั้นมีความให้ตัวและเกิดการสั่นไหวตลอดเวลาที่ทดลอง ทำให้โครงสร้างไม่มั่นคง มีการถอนและสั่นคลอน ไม่ปลอดภัย

แนวทางการแก้ไข ปรับเปลี่ยนวัสดุให้อยู่ตัวและแน่นหนามากว่าสลิง

การปรับใช้ ในการทดลองครั้งที่ 2 และการทดลองครั้งที 3 นั้นได้เปลี่ยนเอาสลิงขึงเป็นเหล็กเส้นแทน ซึ่งได้ติดตั้งเกลียวเร่งไว้ที่ปลายด้านหนึ่ง ทำให้แข็งแรงขึ้น แน่นหนาและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

- ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหาจากการทดลองที่ 2

1.คานบิดตัว

เมื่อคานรับน้ำหนักถึงจุดหนึ่ง การถ่ายแรงจะทำให้คานเกิดการบิดตัว จนทำให้คานไม่สามารถรับน้ำหนักได้มากเท่าที่ควรจะเป็น

แนวทางการแก้ไข เพิ่มการยึดโยงเพื่อหยุดการบิดตัวของคาน โดยในระบบของโครงสร้างพื้นอาจจะใช้วิธียึดโยงไปกับคานในส่วนอื่นๆ

การปรับใช้ นอกจากจะมีการขึงเพื่อเพิ่มระยะการรับน้ำหนักให้กับคาน ยังต้องคำนึงการขึงเพื่อแก้ปัญหาการบิดตัวของคานอีกด้วย

2.การโก่งของคาน

เมื่อคานรับน้ำหนักถึงจุดหนึ่ง แรงที่เกิดขึ้นจะทำให้ท่อกระดาษเกิดการโก่งตัว จนหากท่อกระดาษโก่งตัวมากเกินไปจะทำให้คานหักได้

แนวทางการแก้ไข จำเป็นต้องจับให้ท่อกระดาษไม่โก่งตัวและอยู่ในแนวที่จะรับน้ำหนักโดย

การปรับใช้ จับท่อกระดาษรัดเอาไว้ด้วยกัน เป็นการ ค้ำยันเอาไว้ ในการออกแบบใช้ไม้เข้าไปเป็นแผ่นรองแล้วจึงรัดไว้ด้วยเข็มขัดรัดสายไฟ

- ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหาจากการทดลองที่ 3

1.การเสียระดับ

เมื่อโครงสร้างเริ่มรับน้ำหนัก โครงสร้างทั้งหมดจะเริ่มมีการบิดตัว ซึ่งทำให้ระดับของโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง หากว่าระดับเทไปทางด้านใดด้านหนึ่งมากเกินไปจะทำให้น้ำหนักถูกถ่ายไปทางด้านนั้นมากกว่าส่วนอื่นซึ่งจะเป็นผลให้โครงสร้างรับน้ำหนักได้น้อยกว่าความเป็นจริง

แนวทางการแก้ไข เพิ่มอุปกรณ์ปรับระดับลงไปในระบบโครงสร้างเพื่อแก้ไขระดับในทุกๆการรับน้ำหนัก

การปรับใช้ ในการทดลองได้ใช้วิธีสอดแผ่นเหล็กเพื่อชดเชยระดับที่เปลี่ยนไป แต่ในการปรับใช้จริงแนะนำว่าเพิ่มส่วนปรับระดับที่ชุดข้อต่อเป็นสกรูจะได้ผลที่ดีกว่า

2.การโก่งของคาน

แม้จะมีการประกับไว้ดีแล้ว แต่ในการทดลองที่ 3 ก็ยังมีการโก่งของคานซึ่งเป็นปัญหาหลักในการที่โครงสร้างถึงจุดวิบัติอยู่ดี ซึ่งการโก่งตัวของคานนั้นแปรผันตรงกับน้ำหนักที่โครงสร้างรับไว้นั่นเอง

แนวทางการแก้ไข เพิ่มเติมส่วนประกับให้แน่นหนา หรือเพิ่มโครงสร้างลงไปในท่อกระดาษเช่นใช้ไม้ขัดเป็นแกนเพิ่มในท่อกระดาษ

การปรับใช้ อาจมีการเพิ่มความแข็งแรงให้กับท่อกระดาษได้หลากหลายวิธีเช่นเพิ่มไม้เป็นแกนไว้ภายใน กรอกโฟมให้เต็ม หรือกรอกปูนลงไปเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น

6.3.2 **สรุปแนวทางการปรับปรุง มีดังนี้**

1.แนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติทางการรับแรงของท่อกระดาษ จากการทดสอบ และการทดลองทั้งสามครั้งท่อกระดาษมีความแข็งแรงด้วยโครงสร้างแบบท่อ แต่ยังมีจุดอ่อนคือส่วนรอยต่อของแผ่นกระดาษที่นำมาม้วน หากว่าต้องการเสริมคุณสมบัติในการรับแรงของท่อกระดาษควรใช้การเสริมวัสดุลงไปในท่อกระดาษ

2. แนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติความทนทานต่อสภาพอากาศของท่อกระดาษ จุดอ่อนที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของท่อกระดาษคือไม่ทนทานต่อสภาพอากาศ โดยเฉพาะความชื้น ในปัจจุบันมีเพียงไม่กี่วิธีที่จะทำให้ท่อกระดาษทนทานต่อความชื้นได้คือ 1.เพิ่มส่วนพลาสติกเคลือบในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต ซึ่งวิธีนี้ยังไม่มีอยู่ในการผลิตในประเทศไทย 2.ใช้วิธีการเคลือบน้ำยาแบบเดียวกับการเคลือบไม้ เป็นต้น โดยในวิธีที่ 2 นั้น ยังสามารถเพิ่มความทนไฟ ไม่ลามไปและกันปลวกไปพร้อมๆกันได้อีกด้วย

3.แนวทางการปรับปรุงข้อต่อในระบบพิกัด จากการทดลองผู้วิจัยได้พบว่าข้อต่อไม้ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการใช้งาน และข้อต่อจากเหล็กนั้นก็มีความแข็งแรงแต่มีน้ำหนักมากเกินไป ข้อต่อที่เหมาะสมควรจะมีความแข็งแรงแน่นหนาและมีน้ำหนักเบา ข้อต่อจากพลาสติกซึ่งเป็นชิ้นเดียวกันทั้งหมดเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ เพราะน้ำหนักเบาแต่แข็งแรง อย่างไรก็ตามการผลิตข้อต่อพลาสติกดังที่ว่าต้องใช้การผลิตแบบอุตสาหกรรมจำนวนมากจึงจะเหมาะสม

4.แนวทางการเลือกใช้ขนาดของท่อกระดาษ ท่อกระดาษนั้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์และความยาวให้เลือกมากมาย จากการทดสอบ ท่อกระดาษยิ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางมากยิ่งสามารถรับแรงได้ดีกว่าท่อกระดาษที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย แต่ในการใช้งานทางสถาปัตยกรรมนั้นมีมาตรฐานของท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ที่นำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายทั้งข้อจับข้อเสือ หรือชุดล้อเลื่อนต่างๆซึ่งสามารถนำมาประกอบกับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ได้ทันที

ในด้านความยาว ความจริงแล้วท่อกระดาษสามารถสั่งความยาวได้มากเกินกว่า 10 เมตรด้วยซ้ำ แต่หากมองในด้านการขนส่ง ท่อกระดาษความยาว 2 เมตรจะทำให้สามารถขนส่งได้ง่ายกว่าโดยที่ไม่ต้องใช้รถบรรทุกขนาดใหญ่ในการขนส่ง

ท่อกระดาษที่น่าจะนำมาใช้จึงควรเป็นท่อกระดาษขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ซึ่งมีความยาว 2-3 เมตร แล้วแต่การใช้งาน

6.3.3 แนวทางการประยุกต์ใช้ท่อกระดาษกับงานสถาปัตยกรรม

ท่อกระดาษเหมาะแก่การใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราว ทั้งในแง่ของการรีไซเคิลที่เมื่อเลิกใช้งานโครงสร้างแล้วก็จะสามารถจัดการกับการรื้อถอนได้โดยง่าย ทั้งด้วยน้ำหนักที่เบาทำให้สามารถขนส่งและติดตั้งได้โดยสะดวก เช่นตัวอย่างจากการก่อสร้างเป็นซุ้มประตูในภาคผนวก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างแนวตั้งได้อีกมากมายหากใช้ท่อกระดาษในรูปแบบของโครงถัก

ในโครงสร้างที่ไม่ได้รับน้ำหนักในส่วนหลังคานั้นท่อกระดาษนับว่ามีความเหมาะสมอยู่แล้ว ดังจะเห็นได้ในตัวอย่างของสถาปัตยกรรมฉุกเฉินยามที่เกิดภัยพิบัติต่างๆ ผนวกกับงานวิจัย

“โครงสร้างรับพื้นจากท่อกระดาษ” เมื่อโครงสร้างจากท่อกระดาษสามารถรับน้ำหนักได้เพียงพอ โครงสร้างที่เคยเป็นเพียง Shelter ก็จะสามารถใช้งานแบบอาคารหลายชั้นได้ในที่สุด

เมื่อกล่าวถึงเหตุผลที่ควรวัสดุจากกระดาษ ผู้วิจัยได้พยายามชูประเด็นว่า กระดาษคือไม้ที่ถูกพัฒนาแล้ว หากว่ามีการใช้งานท่อกระดาษที่มากขึ้น ผู้วิจัยเชื่อว่าจะมีการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆให้มีความแข็งแรงเหมาะแก่การนำมาใช้ในงานสถาปัตยกรรมมากยิ่งขึ้น ในอนาคตอันใกล้วัสดุจากกระดาษอาจจะเข้ามาแทนที่วัสดุจากไม้ก็อาจจะเป็นได้

6.4 เปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่าง โครงสร้างที่ทำจากท่อกระดาษ ไม้ และเหล็ก

จากการทดสอบการรับแรงทั้งสามคือ แรงอัด แรงดึง และแรงดัด ทำให้สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะทางการรับแรงระหว่างโครงสร้างที่ทำจากท่อกระดาษ ไม้ และเหล็กได้ นอกจากนี้การทดลองก่อสร้างโครงสร้างซึ่งใช้ท่อกระดาษเป็นโครงสร้างหลักยังทำให้เกิดความเข้าใจต่อการใช้งานและนำไปสู่การเปรียบเทียบเพิ่มเติมอีกด้วย แสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่าง โครงสร้างที่ทำจากท่อกระดาษ ไม้ และเหล็ก

ลักษณะการเปรียบเทียบ/ ประเภทของวัสดุ	ท่อกระดาษ (ความยาว 60 เซนติเมตร)	ไม้	เหล็ก	ปูน
คุณลักษณะทางการรับแรง				
การรับแรงอัด	37.62 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	-	3,530 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	214,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
การรับแรงดึง	49.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	-	5,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนเซนติเมตร (TIS 107HS 51)	-
การรับแรงดัด	3.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	600-1000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	-	-
โดยภาพรวม	รับแรงดึงได้ดีกว่าแรงอัด แต่รับแรงดัดไม่ได้	รับแรงอัดได้ดี และรับแรงดึงได้ดีตามประเภทชนิด ของไม้ แต่ไม้บางประเภทรับดัดได้ดี เช่น ไม้ไผ่ เป็นต้น	สามารถรับแรงได้ดีในทุกทาง	รับอัดได้ดีมากแต่รับแรงดึงไม่ได้
คุณลักษณะทั่วไป				
ความทนทานต่อสภาพอากาศ	สามารถปรับปรุงได้โดยการเสริมพลาสติกลงไปในขั้นตอนอัดรีด หรือ ใช้การเคลือบสารเคลือบผิวเช่นแลคเกอร์เป็นต้น	เคลือบสารเคลือบผิวเช่นน้ำมัน หรือขี้ผึ้ง	ใช้สารป้องกันสนิมและพ่นสีทับ	ฉาบปิดผิว หรือ ทาสี
คุณลักษณะทางการทำงาน				
อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทำงาน	สายรัดท่อ ชุดข้อต่อเฉพาะ	ตะปู เกลียว หรือ ใช้การเข้าสลักโดยช่างผู้ชำนาญ	อุปกรณ์เชื่อมโลหะ หรือ ตะปูเกลียวและการเชื่อมต่อแบบขันเกลียว	อุปกรณ์ในการจัดการงานคอนกรีต
คุณลักษณะทางการย่อยสลาย				
การผลิต	ผลิตจากเศษไม้และเศษกระดาษ	ไม้จริงผลิตผ่านทางอุตสาหกรรมป่าไม้ โดยอาจผลิตเป็นไม้อัดต่อในภายหลังได้	ผลิตจากเศษเหล็กโดยผสมเหล็กบริสุทธิ์เพียงเล็กน้อย	ใช้หินปูนและหินดินดาลที่ระเบิดออกมาจากภูเขามาบดและเผาตามวิธีการ
การนำกลับมาใช้ใหม่	ขยะกระดาษจะถูกนำไปเข้าโรงโม่เพื่อย่อยสลายให้กลายเป็นไยกระดาษ จากนั้นส่งเข้าโรงงานแปรรูปกระดาษต่อไป	ไม้ที่ผุพังแล้วนั้นสามารถนำไปย่อยสลายแล้วจึงเลือกใช้งานได้หลากหลาย ทั้งนำไปผลิตกระดาษอัดเป็นไม้อัด พาติเคิลบอร์ด หรือเสริมลงไปในวัสดุใยหินอื่นๆเป็นต้น	เศษเหล็กนั้นสามารถนำไปใช้ผสมในโรงงานผลิตเหล็กได้ถึง 100% โดยนำเศษเหล็กที่เหลือไปเข้ากระบวนการหลอมเพื่อให้ได้เป็นเหล็กก้อนออกมาก่อนจะนำไปใช้งานต่อไป	คอนกรีตไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เมื่อถูกทุบทำลายแล้ว เศษที่เหลือมักถูกนำไปใช้ถมที่ หรือใช้เป็นคั่นกันน้ำเป็นต้น
ระยะเวลาย่อยสลายตามธรรมชาติ	2-5 เดือน	13 ปี	100 ปี	ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

6.5 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากพฤติกรรมของท่อกระดาษนั้นเกิดความวิบัติที่ท่อกระดาษส่วนนอก จึงควรมีการเสริมท่อกระดาษในส่วนด้านที่ติดกับเสาไว้เป็นสำคัญเนื่องจากเป็นส่วนที่รับแรงมากที่

2. หากทำการยึดโยงไม่ให้แกนตั้งกลางชุดคานเคลื่อนหมุนได้ จะทำให้ระบบคานมีความแข็งแรงและรับน้ำหนักได้มากกว่าเดิม ควรมีการยึดโยงส่วนกลางคานไว้ระหว่างคานในระบบ

3. ระบบการจับท่อด้วยเกลียดรัดท่อควรมีการดามภายในไว้ให้แข็งแรงจะได้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เช่นใช้ท่อเหล็กสอดไว้ด้านในเพื่อรับแรงที่รัดท่อ

4. ความชื้นมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงของท่อกระดาษ ส่วนหนึ่งเป็นเพราะผนังท่อกระดาษนั้นเกิดจากการรีดแผ่นกระดาษด้วยแรงอัดไปพร้อมๆกับกาว จึงควรมีการใช้สารเคลือบผิวป้องกันความชื้นต่อพื้นผิวของท่อกระดาษ ทั้งนี้สารเคลือบผิวอาจเพิ่มเติมคุณสมบัติในการไม่ลามไฟและกันปลวกไปในตัวอีกด้วย ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ดูแลผิวไม้นั้นก็สามารถใช้ทดแทนไปได้เพราะยังไม่มีผลิตภัณฑ์เฉพาะทางสำหรับกระดาษนั่นเอง

5. ระบบข้อต่อที่ทำจากไม้นั้นยังไม่แข็งแรงพอในการนำไปใช้ หากว่าเป็นเหล็กหรือโลหะก็จะมีน้ำหนักมาก ระบบข้อต่อที่เป็นพลาสติกก็ต้องใช้การผลิตคราวละมากๆ จึงยังไม่อาจสรุปวัสดุที่ดีที่สุดที่จะนำมาใช้ทำระบบข้อต่อแต่ควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

   5.1 เบา

   5.2 สามารถใช้งานได้กับทุกๆตำแหน่งที่ต้องการข้อต่อ

   5.3 แข็งแรงทนทาน

6. พิกัดที่ 440 x 240 เมตรนั้น น่าจะเป็นพิกัดที่คุ้มค่าที่สุดที่ยังเพียงพอต่อการใช้งานและรับน้ำหนัก แต่ทั้งนี้ก็ควรจะต้องมีการเลือกใช้ให้คุ้มค่ายิ่งๆขึ้นไปเช่น หากว่าด้านบนของโครงสร้างนั้นรับเพียงน้ำหนักของหลังคา ก็อาจจะลดทอนช่วงเสาให้กลายเป็น 440 x 440 เซนติเมตรได้ตามสมควร เพื่อความคุ้มค่าและการใช้งานที่มีประสิทธิภาพ

รายการอ้างอิง

ชลธี อิ่มอุดม. ระบบโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม.กรุงเทพ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2546.

ปิยะพงษ์ ปันทนา. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของท่อกระดาษผนังบางภายใต้ภาระกดในแนวแกน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2553.

Toyo Ito and selected participants. Tomorrow: where shall we live? : the architectural symposium & exhibition. Thailand :Art4d, 1996.

Matilda Mcquaid. Shigeru Ban. Hong Kong : Phaidon, 2010.

ภาคผนวก

การประกอบซุ้มประตู

การทดลองประกอบซุ้มประตูนั้น เป็นการทดลองประกอบโครงสร้างจากท่อกระดาษขึ้นในแนวตั้ง ด้วยจุดประสงค์เพื่อใช้แขวนแผ่นป้ายในการเปิดตัวคาราวานท่องเที่ยวไทยสำหรับให้รถลอดผ่าน

ปัญหาและแนวทางการแก้ไข ซุ้มประตู

1.**ความไม่เหมาะสมระหว่างข้อเสือและท่อกระดาษ**

การใช้ข้อต่อข้อเสือมีความสะดวกเพราะว่าเป็นวัสดุที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดและท่อกระดาษเปล่าๆนั้นไม่เหมาะกับการใช้ข้อต่อข้อเสือเพราะจะบีบแรงจนท่อกระดาษบุบ เสียหายได้

แนวทางแก้ไข เพิ่มโครงสร้างไว้ด้านในของท่อกระดาษเพื่อรองรับการบีบของข้อต่อข้อเสือ เช่นไม้อัดทำเป็นกากบาทไว้ด้านใน กรอกปูน หรือใส่ท่อเหล็กไว้ด้านในในส่วนที่ต้องรับการบีบ

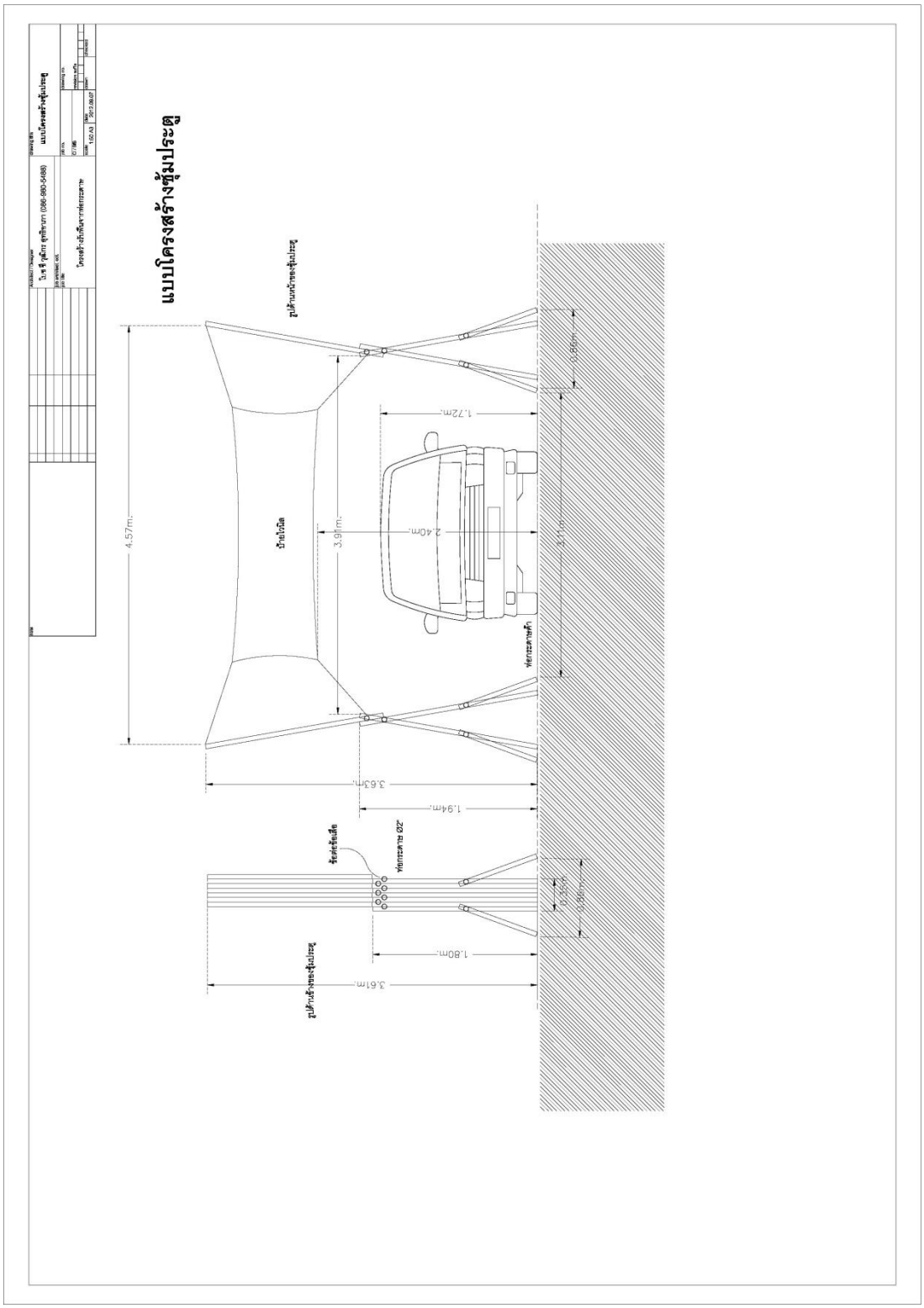
การปรับใช้

การออกแบบชุดคานโครงสร้างจึงมีการทำเดือยเป็นท่อเหล็กสอดไว้เพื่อรับในจุดที่ต้องการบีบรัดด้วยเข็มขัดรัดท่อ ได้ทั้งความแข็งแรงในการยึดจับ ทั้งยังลดแรงเฉือนในบริเวณโคนท่ออีกด้วย

2.**โครงสร้างไม่สามารถต้านแรงลมได้**

ปัญหาเรื่องการถ่วงน้ำหนัก เพราะว่าโครงสร้างกระดาษนั้นมีข้อดีที่ความเบา แต่นั่นกลับเป็นจุดอ่อนในการประกอบโครงสร้างที่จะใช้แขวนป้าย เมื่อนำป้ายผ้าใบขึ้นแขวนแล้วจึงพบว่าแรงลมที่พัดเข้าใส่ป้ายนั้นกลับทำให้โครงสร้างล้มลง

แนวทางแก้ไข ใช้การถ่วงน้ำหนักที่ส่วนฐาน หรือ กางโครงสร้างออกไปเพื่อต้านแรงลม



ภาพที่ 1 แบบ drawing รั้วตาข่ายลวดสลิง

ภาพที่ 2 จัดเรียงท่อกระดาษเพื่อประกอบข้อต่อข้อเสือให้เป็นแนวเดียวกัน

ภาพที่ 3 เสริมท่อกระดาษในแนวตั้งฉากเพื่อยึดโยงท่อกระดาษทั้งหมดไว้ด้วยกัน

ภาพที่ 4 ทดสอบการพับเก็บของชุดท่อกระดาษว่าสามารถพับเก็บเข้าด้วยกันได้แนบสนิทดี

ภาพที่ 5 ประกอบชิ้นส่วนแนวแทยง

ประกอบชิ้นส่วนแนวทแยงเพื่อรับแรงบิด(Bracing) ช่วยให้โครงสร้างทั้งหมดอยู่ด้วยกันได้โดยไม่เอียงล้ม

ภาพที่ 6 ทดสอบขาตั้งของซุ้มประตู

ภาพที่ 7 ขาตั้งซุ้มประตูทั้งสองข้างเมื่อประกอบชิ้นส่วนช่วยค้ำยันแล้ว

ภาพที่ 8 ติดตั้งท่อกระดาษส่วนปลายเพื่อเพิ่มความสูงของซุ้มประตู

ภาพที่ 9 สภาพของซุ้มประตูเมื่อได้ลองประกอบ

ภาพที่ 10 ซุ้มประตูเมื่อพับเก็บเตรียมขนส่ง

ภาพที่ 11 การขนย้ายซุ้มประตู

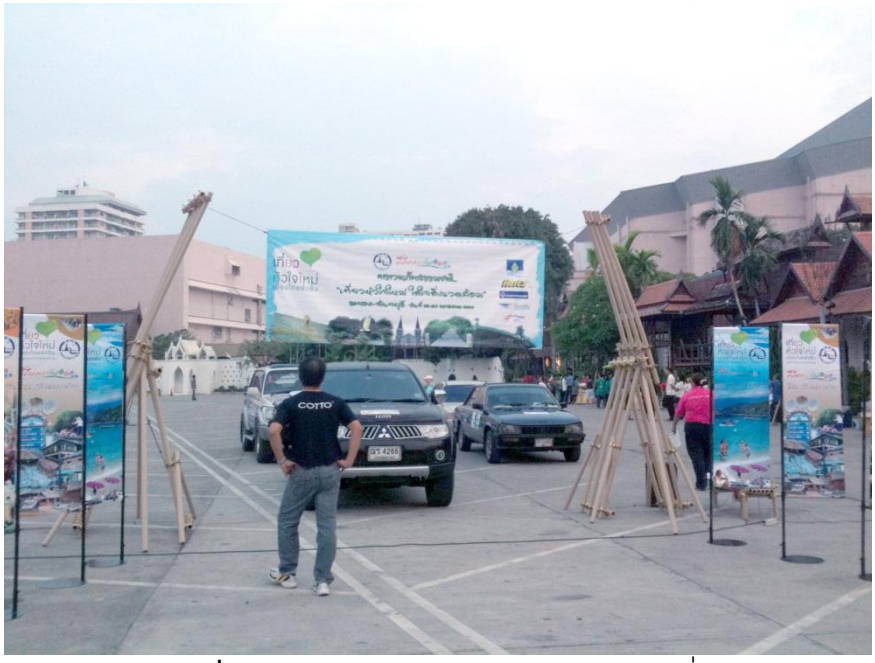
สามารถบรรทุกไปได้ด้วยรถกระบะเพียงหนึ่งคันนำขาตั้งซุ้มประตูเข้าไปประกอบยังพื้นที่

ภาพที่ 12 การประกอบซุ้มประตู

เนื่องจากแรงลมในตอนกลางคืน ณ พื้นที่มีความแรงจนอาจก่อให้เกิดความเสียหายแกซุ้มประตูท่อกระดาษได้หากตั้งและขึงแผ่นป้ายเอาไว้ ด้วยว่าแผ่นป้ายจะต้านแรงลมจนโครงสร้างทั้งหมดล้มลง จึงได้จัดให้โครงสร้างทั้งหมดวางราบไปกับพื้นที่เสียก่อน

ภาพที่ 13 ซุ้มประตู

นำโครงสร้างทั้งหมดตั้งขึ้นและจัดให้เข้าที่ก่อนเริ่มพิธีเปิดขบวนคาราวาน



ภาพที่ 14 ระหว่างพิธีเปิดขบวนคาราวานท่องเที่ยว

ภาพที่ 15 ความสูงของซุ้มประตูเพียงพอที่จะให้รถยนต์สามารถลอดผ่านได้โดยสะดวก

ภาพที่ 16 การใช้งานจริงของซุ้มประตู

แรงลมทำให้เสาของซุ้มประตูแอ่นตัวลงเล็กน้อย แต่ยังปลอดภัยพอที่จะให้รับน้ำหนักของแผ่นป้าย

ภาพที่ 17 ภาพด้านหน้าของซุ้มประตู หลังจากคณะคาราวานออกเดินทางไปแล้ว

ภาพที่ 18 การเก็บซุ้มประตู

นำชิ้นส่วนทั้งหมดพับเพื่อรอการใช้งานในโอกาสต่อไป ขนาดหลังพับเก็บแล้วจะมีขนาดกินพื้นที่ประมาณ 2.00 x 0.50 เมตร และสามารถกองทับกันได้

ภาพที่ 19 ภาพมุมกว้างของซุ้มประตูจากท่อกระดาษภายในพิธีเปิดขบวนคาราวานท่องเที่ยว

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ วุฒิกร สุทธิอาภา

เพศ ชาย

วันเดือนปีเกิด 18 กันยายน 2528

การศึกษา

2544-2546	โรงเรียนวัดราชบพิธ (วิทย์/คณิต)
2547-2552	มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี คณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ ภาควิชาสถาปัตยกรรม ปริญญาตรี
2552-ปัจจุบัน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรม โครงสร้าง(โครงสร้างกระดาษ) ปริญญาโท

ประสบการณ์

2544-ปัจจุบัน	ศิลปกรรม หจก. ดีไซน์เอสแอนด์ที
2548-ปัจจุบัน	ออกแบบสถาปัตยกรรม หจก. ดีไซน์เอสแอนด์ที
2551-2552	ผู้ช่วยสถาปนิก บริษัท โมโนซิมเพล็ก จำกัด
2552-ปัจจุบัน	สถาปนิก หจก. ดีไซน์เอสแอนด์ที
2554-ปัจจุบัน	สถาปนิกและกองบรรณาธิการ แผนกกิจกรรมพิเศษ นิตยสารบ้านและสวน