แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์: กรณีศึกษา การออกแบบศาลาอเนกประสงค์

โดย

นายธนัท ศักดานรเศรษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์: กรณีศึกษา การออกแบบศาลาอเนกประสงค์

โดย

นายธนัท ศักดานรเศรษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศา
ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDELINE OF CURVILINEAR GEOMETRY ARCHITECTURE FOR 3D PRINTING TECHNOLOGY USING CEMENT-BASED SYSTEM: CASE STUDY A MULTI-PURPOSE PAVILION

BY

MR. THANUT SAKDANARASETH

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF ARCHITECTURE

ARCHITECTURE

FACULTY OF ARCHITECTURE AND PLANNING

THAMMASAT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2015

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง

วิทยานิพนธ์

ของ

นายธนัท ศักดานรเศรษฐ์

เรื่อง

แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง
ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์:
กรณีศึกษา การออกแบบศาลาอเนกประสงค์

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2559

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ _____
(รองศาสตราจารย์ ดร. สายันต์ ศิริมนตรี)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ _____
(ศาสตราจารย์ ดร. วิมลสิทธิ์ หรยางกูร)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ _____
(อาจารย์ ดร. ลาภยศ ประสิทธิโศภิน)

คณบดี _____
(รองศาสตราจารย์ เฉลิมวัฒน์ ตันตสวัสดิ์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์: กรณีศึกษา การออกแบบศาลาอเนกประสงค์
ชื่อผู้เขียน	นายธนัท ศักดานรเศรษฐ์
ชื่อปริญญา	สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สถาปัตยกรรม สถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศาสตราจารย์ ดร. วิมลสิทธิ์ หรยางกูร
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

คอนกรีตมีบทบาทสำคัญอย่างมากเนื่องจากถูกใช้เป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง ด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่มีความแข็งแรงและทนทาน แต่ในการก่อสร้างงานสถาปัตยกรรมคอนกรีตรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งยังมีข้อจำกัดและพบปัญหาในกระบวนการก่อสร้าง ซึ่งได้แก่ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากฝีมือมนุษย์ ระยะเวลาก่อสร้างที่ยาวนานอันเป็นผลมาจากข้อจำกัดของวัสดุและกระบวนการก่อสร้างที่มีหลายขั้นตอน ขยะที่เกิดจากกระบวนการก่อสร้าง และต้นทุนในการก่อสร้างที่มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น อันเป็นผลมาจากแรงงานที่หายากและค่าแรงที่เพิ่มสูงขึ้น จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ขึ้น เพื่อคลี่คลายปัญหาและก้าวข้ามข้อจำกัดในกระบวนการก่อสร้างดังกล่าว งานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มาใช้ในงานสถาปัตยกรรม โดยมุ่งเน้นการศึกษาด้าน 1) การออกแบบศาลาอเนกประสงค์ 2) ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้าง 3) ความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง โดยผลการวิจัยจะเป็นการเสนอแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างที่จะช่วยพัฒนาองค์ความรู้ในการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ซึ่งจะเข้ามามีบทบาทสำคัญกับวงการสถาปัตยกรรมในอนาคต

ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีการออกแบบรูปทรงทางสถาปัตยกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง และได้ศึกษาหลักการทำงานและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วย เพื่อนำมาใช้ในการคลี่คลายแบบสำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ด้วยเทคโนโลยีดังกล่าว ทั้งนี้ได้มีการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงโครงสร้างของศาลาอเนกประสงค์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และได้ออกแบบข้อต่อพุกกัลวาไนซ์และวิธีการประกอบชิ้นงานในกระบวนการ

ก่อสร้างอย่างเป็นลำดับขั้นตอนเพื่อลดข้อบกพร่องของงานก่อสร้าง โดยศึกษาแนวทางจากกรณีศึกษาสถาปัตยกรรมที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ รวมถึงการศึกษาความเป็นไปได้ในการก่อสร้างและการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงการลงทุน

ผลการศึกษาพบว่าการสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ จะต้องออกแบบให้ชิ้นส่วนรับแรงอัดเพียงอย่างเดียวจึงเหมาะสม เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์สามารถรับแรงอัดได้ดี แต่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้รูปทรงเปลือกโค้ง (shell) ที่สามารถออกแบบให้เกิดการถ่ายเทแรงอัดภายในรูปทรงได้ทั้งหมด การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ยังคงมีข้อจำกัดในด้านการพิมพ์รูปทรงบางประเภท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยในการพัฒนาเทคโนโลยี 2 ประการ ได้แก่ เทคนิคในการพิมพ์ชิ้นงาน และคุณสมบัติของวัสดุ สำหรับขนาดของชิ้นงานที่เครื่องพิมพ์สามารถขึ้นรูปได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยเดียว คือ ขนาดของเครื่องพิมพ์สามมิติ การออกแบบข้อต่อที่ช่วยให้การประกอบมีความแม่นยำจะช่วยให้ได้งานที่มีความถูกต้อง และการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการขึ้นรูปชิ้นงานสามารถลดขั้นตอนการทำงานได้ ในขณะที่ต้นทุนในการก่อสร้างถูกกว่าเทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูป

คำสำคัญ: เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์, รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง, ศาลา

Thesis Title	DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDELINE OF CURVILINEAR GEOMETRY ARCHITECTURE FOR 3D PRINTING TECHNOLOGY USING CEMENT-BASED SYSTEM: CASE STUDY A MULTI-PURPOSE PAVILION
Author	Mr. Thanut Sakdanaraseth
Degree	Master of Architecture
Major Field/Faculty/University	Architecture Architecture and Planning Thammasat University
Thesis Advisor	Professor Vimolsiddhi Horayangkura, Ph.D.
Academic Years	2015

ABSTRACT

Concrete has always been playing vital role in construction field because of its qualities of being durable and withstanding. However, in architectural construction, curvilinear concrete form still faces limitation and complication. These can commonly be found as imprecision of human error, time span of the project, waste produced in construction process or excessive production expenditure, which is likely to increase progressively due to the demand and raised labour cost. Thus the 3D printing technology using cement-based system has been developed to tackle these problems and being beyond the boundary of manpower construction. This cement-based 3D printing experimental research intends to focus on: 1) The design of a self-supporting curvilinear geometry pavilion; 2) The structural stability and strength of the pavilion; 3) The method of construction and joint assembly, which will contribute to technological knowledge that is undeniably becoming the future of construction industry.

This study explores the theory of architectural form in order to design a curvilinear geometry pavilion, and also the nature and the limitation of 3D printing technology, to the extent of programming CAD model for modular structure of the pavilion. In addition, there is an analysis for constructional probability by digital simulation with an extensive explanation on the jointing system and step-by-step assemble process to reduce errors to

minimum, which is based on existing case studies, including a demonstration for its potential in practical construction and business aspect.

The research shows that the most suitable structure for curvilinear geometry architecture constructed with cement-based 3D print is the compressive structure. This is due to the characteristic of cement that can be compression-resistant and cannot endure tension force. The design of the curvilinear geometry architecture will be based on shell structure, which is able to transfer internal compressive forces between modular. The application of cement-based 3D print, however, still has limitations on particular forms depending on 2 technological development factors, which are the printing techniques and the characteristic of the materials, while the size of printed structure will follow accordingly to the size of 3D printer. Well-designed jointing system and assembly process will enhance the accuracy of the architecture. The introduction of 3D printing technology in module modeling will significantly reduce the length of process and the expenditure, comparing to the commonly used existing method, which is molding technique.

Keywords: 3 D Printing Technology Using Cement-based System, Curvilinear Form, Pavilion

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (1)

สารบัญ (3)

สารบัญตาราง (7)

สารบัญภาพ (8)

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 คำถามวิจัย 1
1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย 2
1.4 ขอบเขตการวิจัย 2
1.4.1 ขอบเขตการศึกษา 2
1.4.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 3
1.5 ข้อจำกัดในงานวิจัย 3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 กระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง 6
2.1.1 การก่อโครงและฉาบคอนกรีต (traditional way) 6
2.1.2 การหล่อในที่ (Cast in Place) 8
2.1.3 การหล่อขึ้นรูปสำเร็จ (Molding) 9

2.2 ทฤษฎีการสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง 12
2.2.1 แนวคิดของโครงสร้างเชิงเส้นโค้ง 12
2.2.2 ความโค้ง (Curvatures) 13
2.2.3 การสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง 16
2.3 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 22
2.3.1 ประเภทของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 22
2.3.2 หลักการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติระบบ FDM 25
2.4 กรณีศึกษาศาลาขนาดเล็กที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ 34
2.5.1 Silky Concrete Project: Massive Concrete Installation 34
2.5.2 Vulcan, World’s Largest 3D Printed Pavilion 39

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย 46

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย 46
3.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย 46
3.3 ตัวแปรที่ศึกษา 47
3.4 การประเมิน 47
3.4 การกำหนดโจทย์ในการออกแบบ 47

บทที่ 4 การวิเคราะห์พื้นที่และกำหนดรายละเอียดศาลาอเนกประสงค์ 50

4.1 ทำเลที่ตั้ง: สวนลุมพินี 50
4.1.1 การเข้าถึงที่ตั้ง 51
4.1.2 กิจกรรมในพื้นที่ 52
4.2 การเลือกที่ตั้งศาลาอเนกประสงค์ 58
4.2.1 เกณฑ์การเลือกที่ตั้ง 58
4.2.2 ที่ตั้งที่มีความเหมาะสม 58
4.3 การประเมินความเหมาะสมของที่ตั้ง 60
4.4 รายละเอียดวัตถุประสงค์ 62

4.4.1 เป้าหมาย 62
4.4.2 วัตถุประสงค์ 62
4.4.3 แนวความคิดในการออกแบบ 62
4.5 รายละเอียดสภาพแวดล้อมของที่ตั้งศาลาอเนกประสงค์ 63
4.6 รายละเอียดกิจกรรม 66
4.6.1 หน้าที่ใช้สอยและกิจกรรม 66
4.6.2 กลุ่มผู้ใช้งานศาลาอเนกประสงค์ 66

บทที่ 5 การออกแบบศาลาอเนกประสงค์ 67

5.1 แนวความคิดในการออกแบบ 68
5.2 การออกแบบรูปทรงศาลาอเนกประสงค์ 69
5.2.1 ศาลารูปแบบที่ 1 69
5.2.2 ศาลารูปแบบที่ 2 71
5.3 การออกแบบโครงสร้างศาลาอเนกประสงค์ 73
5.3.1 การทอนรูปทรงศาลาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย 73
5.3.2 การออกแบบโครงสร้างภายในชิ้นส่วน 76
5.4 การประเมินความเป็นไปได้ในเชิงโครงสร้าง 78
5.4.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพของศาลาอเนกประสงค์ 79
5.4.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้น (Stress Analysis) 85
5.5 การจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ 89
5.6 การศึกษาวิธีการประกอบชิ้นงานและขั้นตอนการก่อสร้าง 94
5.6.1 การออกแบบข้อต่อสำหรับการประกอบชิ้นส่วน 94
5.6.2 การติดตั้งพุกกัลวาไนซ์เพื่อใช้เป็นข้อต่อชิ้นส่วนวัสดุซีเมนต์ 97
5.6.3 ขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ในกระบวนการก่อสร้าง 102
5.7 การประเมินผลการออกแบบและความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง 109
5.7.1 การประเมินผลการออกแบบศาลาอเนกประสงค์ 109
5.7.2 การประเมินความเป็นไปได้ในการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์ 110

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย 113

รายการอ้างอิง 116

ภาคผนวก 119

ที่มาของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 120

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนภูมิแสดงกระบวนการวิจัยการออกแบบและก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์ 4

2.1 เปรียบเทียบการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงอิสระด้วยวัสดุคอนกรีต 3 วิธี 10

2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของระบบการพิมพ์สามมิติ 2 ระบบ 24

2.3 เปรียบเทียบกรณีศึกษาศาลารูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง 44

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เครื่องมือที่ใช้ 49

4.1 เปรียบเทียบพื้นที่ที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์ 59

4.2 เปรียบเทียบการประเมินความเหมาะสมของที่ตั้ง 61

5.1 คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีต (Concrete) 78

5.2 คุณสมบัติเชิงกายภาพของศาลาอเนกประสงค์ที่ใช้วัสดุคอนกรีต (Concrete) 79

5.3 คุณสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์แต่ละชิ้น 80

5.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความเค้น 85

5.5 คุณสมบัติเฉพาะของพุกกัลวาไนซ์แต่ละขนาด 96

5.6 เปรียบเทียบขั้นตอนขึ้นรูประหว่างการหล่อขึ้นรูปและการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 110

5.7 เปรียบเทียบราคาการขึ้นรูประหว่างการหล่อขึ้นรูปและการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 111

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การก่อโครงและฉาบคอนกรีตเพื่อสร้างผนังอาคาร	6
2.2 การก่อโครงและฉีดพ่นคอนกรีตเพื่อสร้างผนังอาคาร	7
2.3 การก่อโครงและฉีดพ่นคอนกรีตเพื่อสร้างผนังอาคาร	7
2.4 การหล่อในที่เพื่อสร้างลานสเก็ตบอร์ดในรัฐแคลิฟอร์เนีย	8
2.5 การหล่อขึ้นรูปสำเร็จชิ้นส่วนของอาคาร	9
2.6 การใช้กระดาษแสดงหลักการของโครงสร้างต้านทานรูปทรง	12
2.7 การวัดความโค้งของพื้นผิวโดมทรงกลม	13
2.8 การวัดความโค้งของพื้นผิวโดมพาลาโบลิค	13
2.9 การคลี่พื้นผิวที่มีคุณสมบัติแบบ synclastic ของโดมทรงกลม	14
2.10 เส้นทึบแสดงแรงอัดและเส้นประแสดงแรงดึงภายในรูปทรงเปลือกโค้งแบบโดม	14
2.11 การวัดความโค้งบนพื้นผิวแบบอานม้า	15
2.12 เส้นโค้งที่อยู่ในพื้นผิวแบบอานม้า	15
2.13 การวัดความโค้งบนพื้นผิวของทรงกระบอกปกติและทรงกระบอกแบบบิด	15
2.14 ผิวโค้งจากการหมุนเส้นโค้งรอบแกน (Rotational Surfaces)	16
2.15 ผิวโค้งจากการหมุนเส้นโค้งรอบแกน (Rotational Surfaces)	17
2.16 ผิวโค้งจากการหมุนเส้นโค้งรอบแกน (Rotational Surfaces)	17
2.17 การสร้างพื้นผิวทรงกระบอก (Cylindrical Surfaces)	18
2.18 การสร้างพื้นผิวโค้งจากหลักการ Translational Surfaces	18
2.19 การสร้างพื้นผิวแบบพาลาโบลอยและการสร้างพื้นผิววงรี	19
2.20 การสร้างพื้นผิวแบบไฮเปอร์โบลิคพาลาโบลอย (hyperbolic paraboloid)	19
2.21 การสร้างพื้นผิวเชิงบรรทัด (ruled surfaces)	20
2.22 พื้นผิวเชิงบรรทัด (ruled surfaces)	20
2.23 groined vault และ undulated plane	21
2.24 undulated conical surface และ undulated spherical sector	21
2.25 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ Extrusion Deposition (FDM)	22
2.26 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ Powder Bed and Inkjet Head (SLS)	23
2.27 หลักการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติระบบ FDM	25

2.28 การแปลงรูปทรงตามหลักการสร้างเส้น contour 25
2.29 การขึ้นรูปโดยที่มีความสูงระหว่างชั้นห่างกันน้อย (ซ้าย) และห่างกันมาก (ขวา) 26
2.30 การหด (offset) เส้นรอบรูปเพื่อชดเชยพื้นที่สำหรับวัสดุ 26
2.31 องค์ประกอบของรูปทรงที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ 27
2.32 เปลือก (shell) ของรูปทรงที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน 27
2.33 ส่วนเติมเต็ม (infill) ของรูปทรงที่มีเปอร์เซ็นความหนาแน่นแตกต่างกัน 27
2.34 เปลือก (shell) และส่วนเติมเต็ม (infill) ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ 28
2.35 การแปลงรูปทรงให้มีลักษณะเป็นชั้น 28
2.36 การทอนรูปทรงให้มีระนาบเรียบโดยการตัดแบ่ง 29
2.37 รูปทรงที่ยื่นออกจากฐานในองศา a (ซ้าย) ที่จะไม่พังทลาย และองศา b (ขวา) ที่จะพังทลาย 29
2.38 รูปทรงลักษณะคานยื่นจะพังทลายหากไม่มีส่วนรองรับในระหว่างการขึ้นรูป 30
2.39 Silky Concrete Project 30
2.40 แบบจำลองสามมิติของ Silky Concrete Project 31
2.41 การพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์สำหรับงานอุตสาหกรรม 31
2.42 การออกแบบชิ้นส่วนของ Silky Concrete Project 32
2.43 การเทซีเมนต์ลงในชิ้นงานขึ้นรูปของ Silky Concrete Project 32
2.44 การประกอบชิ้นงานโดยมีการใส่สลักไว้ระหว่างชิ้นส่วนแต่ละชิ้น 33
2.45 ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นประกอบรวมกันเป็นโครงสร้างแบบสามเหลี่ยม 34
2.46 การประกอบชิ้นงานโดยทีมนักศึกษา 35
2.47 Vulcan Pavilion 35
2.48 แบบจำลองสามมิติของ Vulcan Pavilion 36
2.49 มุมมองภายใน Vulcan Pavilion 36
2.50 รายละเอียดชิ้นส่วนของ Vulcan Pavilion 37
2.51 การขึ้นรูปชิ้นส่วนของ Vulcan Pavilion ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ 38
2.52 การประกอบส่วนของศาลาทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกัน 38
2.53 Vulcan Pavilion 39
2.54 แบบจำลองสามมิติของ Vulcan Pavilion 40
2.55 มุมมองภายใน Vulcan Pavilion 40
2.56 รายละเอียดชิ้นส่วนของ Vulcan Pavilion 41

2.57 การขึ้นรูปชิ้นส่วนของ Vulcan Pavilion ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ 41
2.58 การประกอบส่วนของศาลาทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกัน 42
2.59 Vulcan Pavilion 42
2.60 Vulcan Pavilion 43
3.1 แผนดำเนินการวิจัยการออกแบบและก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์ 48
4.1 ทัศนียภาพภายในสวนลุมพินี 50
4.2 แผนผังแสดงช่องทางการเข้าถึงที่ตั้งสวนลุมพินี 51
4.3 กิจกรรมนันทนาการภายในสวนลุมพินี 53
4.4 กิจกรรมนันทนาการภายในสวนลุมพินี 53
4.5 แผนผังแสดงเส้นทางการวิ่งในสวนลุมพินี 54
4.6 การวิ่งออกกำลังกายในสวนลุมพินี 55
4.7 กลุ่มผู้ทำกายบริหารในสวนลุมพินี 55
4.8 แผนผังงานเที่ยวเมืองไทยประจำปี 2559 56
4.9 กิจกรรมในงานเที่ยวเมืองไทยประจำปี 2559 57
4.10 กิจกรรมในงานเที่ยวเมืองไทยประจำปี 2559 57
4.11 แผนผังแสดงตำแหน่งพื้นที่ที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์ 58
4.12 ผังพื้นที่เกาะกลางบริเวณเก๋งจีน 63
4.13 ทัศนียภาพพื้นที่เมื่อมองจากเส้นทางวิ่งหลัก 64
4.14 ทัศนียภาพพื้นที่เกาะกลางบริเวณเก๋งจีน 64
4.15 ทัศนียภาพพื้นที่เกาะกลางบริเวณเก๋งจีน 65
4.16 พื้นที่สำหรับออกกำลังกายประเภทยกน้ำหนัก 65
5.1 ขั้นตอนการศึกษาในกระบวนการออกแบบ 67
5.2 แรงอัดและแรงดึงภายในโดมและแรงที่ทำมุมในองศาที่เหมาะสม 68
5.3 groined vault 68
5.4 ขั้นตอนวางผังและออกแบบศาลารูปแบบที่ 1 69
5.5 ผังพื้นที่ของศาลารูปแบบที่ 1 70
5.6 รูปด้านรูปที่ 1 ของศาลารูปแบบที่ 1 70
5.7 รูปด้านรูปที่ 2 ของศาลารูปแบบที่ 1 71
5.8 ขั้นตอนวางผังและออกแบบศาลารูปแบบที่ 2 71
5.9 ผังพื้นที่ของศาลารูปแบบที่ 2 72

5.10 รูปด้านรูปที่ 1 ของศาลารูปแบบที่ 2 72
5.11 รูปด้านรูปที่ 2 ของศาลารูปแบบที่ 2 73
5.12 หลักการเรียงอิฐซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) 73
5.13 การทอนรูปทรงศาลาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย 74
5.14 รูปด้านที่ 1 ของศาลาที่ทอนรูปทรงแล้ว 74
5.15 รูปด้านที่ 2 ของศาลาที่ทอนรูปทรงแล้ว 74
5.16 การทอนรูปทรงของศาลาในแต่ละแถว 75
5.17 แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างภายใน 76
5.18 รูปด้านที่ 1 ของศาลาที่ออกแบบโครงสร้างภายในแล้ว 76
5.19 รูปด้านที่ 2 ของศาลาที่ออกแบบโครงสร้างภายในแล้ว 76
5.20 การออกแบบโครงสร้างภายในชิ้นส่วนแต่ละแถว 77
5.21 รหัสและตำแหน่งการวางชิ้นส่วนแต่ละชิ้น 79
5.22 การวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ 85
5.23 ผลการวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ 86
5.24 ผลการวิเคราะห์การเสียรูปจากการรับแรงของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ 87
5.25 การวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ 88
5.26 ผังแสดงรหัสและตำแหน่งของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น 89
5.27 รหัสและลักษณะของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น 89
5.28 กระบวนการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ 90
5.29 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นส่วนรหัส B16 90
5.30 หน้าตัดของชิ้นส่วนรหัส B16 91
5.31 หน้าตัดชิ้นส่วนรหัส B16 และเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดวัสดุ 91
5.32 แบบในการขึ้นรูปชิ้นส่วนรหัส B16 92
5.33 ลักษณะของชิ้นส่วนรหัส B16 ที่ได้จากการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 92
5.34 หน้าตัดชิ้นส่วนรหัส B04 และ B16 ที่เหมือนกันในแบบภาพสะท้อน (mirror) 93
5.35 รหัสและแบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นส่วนแต่ละชิ้น 93
5.36 แนวคิดในการออกแบบข้อต่อของชิ้นส่วน 94
5.37 แนวคิดในการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน 94
5.38 ชิ้นส่วนเมื่อประกอบเข้าด้วยกันแล้ว 94
5.39 พุกเหล็ก ขนาด 3/8" 95

5.40 พุกกัลวาไนซ์ ขนาด 3/8" 95
5.41 พุกกัลวาไนซ์ ขนาด 3/8" 96
5.42 การหาพิกัดในการเจาะรูเพื่อติดตั้งพุก 97
5.43 ตำแหน่งการเจาะรูที่ได้จากการระบุพิกัด 97
5.44 การเจาะรูชิ้นงานในองศาที่ตั้งฉากกับระนาบที่เจาะ 98
5.45 การติดตั้งพุกกัลวาไนซ์ในชิ้นงาน 98
5.46 การไขสกรูเพื่อยึดชิ้นงานเข้าด้วยกัน 99
5.47 ชิ้นงานที่ถูกยึดเข้าหากันด้วยพุก 99
5.48 หุ่นจำลองขนาด 1:5 แสดงรายละเอียดทางโครงสร้างของชิ้นส่วน B16 และ B17 100
5.49 หุ่นจำลองขนาด 1:5 แสดงรายละเอียดรอยต่อของชิ้นส่วน B16 และ B17 101
5.50 หุ่นจำลองขนาด 1:5 แสดงรายละเอียดรอยต่อของชิ้นส่วน B16 และ B17 101
5.51 การประกอบนั่งร้านเพื่อเตรียมการก่อสร้าง 102
5.52 การสร้างโครงสร้างชั่วคราวเพื่อรองรับชิ้นส่วน 103
5.53 การเริ่มเรียงชิ้นส่วนจากส่วนล่างของแต่ละแถว 104
5.54 การเรียงชิ้นส่วนจากล่างขึ้นบนตามลำดับ 104
5.55 การวางชิ้นกลางของแถวเป็นชิ้นสุดท้าย 105
5.56 การเริ่มเรียงชิ้นส่วนในแถวถัดมา 105
5.57 การเรียงชิ้นส่วนจากล่างขึ้นบนตามลำดับจนครบทั้งแถว 106
5.58 การประกอบชิ้นงานแถวถัดไปตามกระบวนการเดียวกันกับแถวก่อนหน้า 106
5.59 การประกอบชิ้นงานให้ครบทุกแถว 107
5.60 การฉาบปูนทับส่วนผิวนอกของศาลาเพื่อปิดรอยต่อ 107
5.61 การทำระบบกันซึมให้กับผิวซีเมนต์ที่ฉาบปิดรอยต่อของชิ้นส่วน 108
5.62 การรื้อถอนโครงสร้างชั่วคราวออก 108

ผ.1 ภาพแสดงแนวคิดในการสร้างเส้น contour ของ Joseph E. Blanther 120
ผ.2 เครื่องพิมพ์สามมิติแบบ stereolithography ต้นแบบของเครื่องพิมพ์สามมิติ 121
ผ.3 การพิมพ์สามมิติระบบ FDM (Fused Deposition Modelling) 122
ผ.4 การพิมพ์สามมิติระบบ SLS (Selective Laser Sintering) 122
ผ.5 ชิ้นงานต้นแบบของ Sagrada Familia ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ 123
ผ.6 ห้องทำงานของสถาปนิกใน Sagrada Familia 124

ผ.7 ชิ้นงานต้นแบบที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ D-Shape ในโรงงาน 124
ผ.8 ทีมพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ระบบ FDM ของ Freeform Construction 125
ผ.9 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ FDM ของ Freeform Construction 126
ผ.10 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ FDM ของ Freeform Construction 126
ผ.11 แนวคิดการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ระบบ FDM ในการสร้างอาคารขนาดใหญ่ 127
ผ.12 การทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ Contour Crafting 127
ผ.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ SLS ของ Emerging Objects 128
ผ.14 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ SLS ของ Emerging Objects 128
ผ.15 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ SLS ของ Emerging Objects 129
ผ.16 Landscape House ออกแบบโดยกลุ่มสถาปนิก Universe Architecture 129
ผ.17 การทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ WINSUN 130
ผ.18 การก่อสร้างอาคารด้วยการพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ WINSUN 130
ผ.19 การก่อสร้างอาคารด้วยการพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ WINSUN 131
ผ.20 อาคารที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ WINSUN 131
ผ.21 งานออกแบบอาคารสำนักงานที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ 132
ผ.22 งานออกแบบอาคารสำนักงานที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ 132
ผ.23 Y-BOX Pavilion ที่จัดแสดงในงานสถาปนิก’59 133
ผ.24 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ระบบ FDM ของ SCG 134
ผ.25 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ระบบ FDM ของ SCG 134
ผ.26 แผนภาพแสดงการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 135

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

คอนกรีตมีบทบาทสำคัญอย่างมากเนื่องจากถูกใช้เป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง ด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่มีความแข็งแรงและทนทาน สำหรับในบริบทประเทศไทย คอนกรีตเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูกเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น อีกทั้งช่างก่อสร้างยังมีความชำนาญในการทำงานก่อสร้างด้วยวัสดุคอนกรีต ทำให้คอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่ในการก่อสร้างงานสถาปัตยกรรมคอนกรีตรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งยังมีข้อจำกัดและพบปัญหาในกระบวนการก่อสร้าง ซึ่งได้แก่ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากฝีมือมนุษย์ ระยะเวลาก่อสร้างที่ยาวนานอันเป็นผลมาจากข้อจำกัดของวัสดุและกระบวนการก่อสร้างที่มีหลายขั้นตอน ขยะที่เกิดจากกระบวนการก่อสร้าง และต้นทุนในการก่อสร้างที่มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น อันเป็นผลมาจากแรงงานที่หายากและค่าแรงที่เพิ่มสูงขึ้น

เมื่อเทคโนโลยีการผลิตแบบดิจิทอล (Digital Fabrication) เข้ามามีบทบาทในวงการสถาปัตยกรรม ก็ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางแนวความคิดและกระบวนการทำงานของสถาปนิก ทั้งในการออกแบบ (Computer Aided Design) คอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการทำงานออกแบบของสถาปนิก และในด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง (Computer Aided Manufacturing) คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ถูกนำมาใช้ในระบบอุตสาหกรรมการผลิตและการก่อสร้าง และเทคโนโลยีที่กำลังถูกพัฒนาและมีแนวโน้มที่จะเข้ามามีบทบาทสำคัญกับวงการก่อสร้างในอนาคตคือ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่จะช่วยให้สถาปนิกสามารถคลี่คลายปัญหาและก้าวข้ามข้อจำกัดในกระบวนการก่อสร้างดังกล่าว

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มาใช้ในงานสถาปัตยกรรม ผ่านกระบวนการออกแบบและก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง โดยมุ่งเน้นการศึกษาด้าน 1) การออกแบบศาลาอเนกประสงค์ 2) ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้าง 3) ความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง ซึ่งครอบคลุมถึงการออกแบบข้อต่อและวิธีการประกอบชิ้นงานเพื่อลดข้อบกพร่องของงานก่อสร้าง รวมถึงการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงการลงทุน โดยผลการวิจัยจะเป็นการเสนอแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างที่จะช่วยพัฒนาองค์ความรู้ในการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เพื่อการก่อสร้าง ซึ่งจะเข้ามามีบทบาทสำคัญกับวงการสถาปัตยกรรมในอนาคต

1.2 คำถามวิจัย

การนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มาใช้ในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งมีแนวทางการออกแบบและก่อสร้างอย่างไร และมีสถานภาพการใช้งานเป็นอย่างไร

1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาปัญหาที่พบในกระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งและหาแนวทางแก้ไขปัญหาโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์
2. ศึกษาการออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งเพื่อการก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์
3. ศึกษาสถานภาพของการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สำหรับสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง
4. วิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้างของศาลาอเนกประสงค์
5. เสนอแนวทางในการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ครอบคลุมถึงการออกแบบข้อต่อและวิธีการประกอบชิ้นงานเพื่อลดข้อบกพร่องของงานก่อสร้าง และประเมินผลการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการก่อสร้าง
6. วิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงการลงทุน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ขอบเขตการศึกษา

1. การออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งให้มีความเป็นไปได้ของการใช้งาน
2. การวิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้างของศาลาอเนกประสงค์
3. การออกแบบข้อต่อและวิธีการประกอบเพื่อลดข้อบกพร่องของงานก่อสร้าง
4. การศึกษาความเป็นไปได้ของวิธีการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์
5. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงการลงทุนการก่อสร้าง

1.4.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

1. รูปแบบของศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง
2. ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้างของศาลาอเนกประสงค์
3. ความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง
4. เทคโนโลยีในการก่อสร้าง
5. ค่าก่อสร้างเปรียบเทียบกับระบบก่อสร้างทั่วไป

1.5 ข้อจำกัดในงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสถานภาพของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สำหรับใช้ในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง ซึ่งมีข้อจำกัดในการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาภายใต้ข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเทคโนโลยี เนื่องจากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่และยังไม่แพร่หลายในวงการก่อสร้างของประเทศไทย ซึ่งมีข้อจำกัดในการเข้าถึงเทคโนโลยีที่ใช้

2. ศึกษาภายใต้ข้อจำกัดทางด้านงบประมาณในการทำงานวิจัย เนื่องจากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เป็นเทคโนโลยีที่ต้องใช้ต้นทุนสูงในการดำเนินการ การทดลองจึงมีขอบเขตที่จำกัด

3. ศึกษาภายใต้ข้อจำกัดทางด้านระยะเวลาในการทำงานวิจัยที่ต้องสิ้นสุดในระยะเวลาที่กำหนด

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เสริมสร้างองค์ความรู้ในการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการก่อสร้างงานสถาปัตยกรรม

2. เสนอแนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

3. ประเมินศักยภาพของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการทำงานสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งในช่วงเวลาที่ทำการวิจัย เพื่อชี้ให้เห็นข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีสำหรับนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

ตารางที่ 1.1

แผนภูมิแสดงกระบวนการวิจัยการออกแบบและก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์

หัวข้อวิจัย	วัตถุประสงค์การวิจัย	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	วิธีการวิจัย	ตัวแปรในงานวิจัย	ผลการศึกษา	สรุปผลการศึกษา
แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ กรณีศึกษา: การออกแบบศาลาอเนกประสงค์	1. ศึกษาปัญหาที่พบในกระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง และหาแนวทางแก้ไขปัญหาโดยการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 2. ศึกษาการออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งเพื่อการก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 3. วิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้างของศาลาอเนกประสงค์ 4. เสนอแนวทางในการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ครอบคลุมถึงการออกแบบข้อต่อและวิธีการประกอบชิ้นงานเพื่อลดข้อบกพร่องของงานก่อสร้าง และประเมินผลการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการก่อสร้าง 5. วิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงการลงทุน	1. เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 2. กระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง 3. ทฤษฎีการออกแบบรูปทรงทางสถาปัตยกรรม 4. กรณีศึกษาสถาปัตยกรรมที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ	1. ศึกษาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เพื่อนำมาใช้ในงานสถาปัตยกรรม ศึกษาหลักการทำงานและข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์สามมิติ รวมถึงกรณีศึกษาสถาปัตยกรรมที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการก่อสร้าง 2. ออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งและคลี่คลายแบบเพื่อใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการก่อสร้าง 3. ศึกษาความมั่นคงแข็งแรงของศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง โดยการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของรูปแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 4. ศึกษาวิธีการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ซึ่งครอบคลุมถึงการออกแบบข้อต่อและวิธีการประกอบชิ้นงานให้ไม่มีข้อบกพร่องของงานก่อสร้าง **5.** ประเมินความเป็นไปได้ของการใช้งาน ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้าง และความเป็นไปได้ในการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง	1. รูปแบบของศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง 2. ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้างของศาลาอเนกประสงค์ 3. ความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง 4. เทคโนโลยีในการก่อสร้าง 5. ค่าก่อสร้างเปรียบเทียบกับระบบก่อสร้างทั่วไป	1. แนวทางการออกแบบสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งเพื่อการก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 2. ผลการวิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้างของศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง 3. แนวทางการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง 4. ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงการลงทุนการก่อสร้าง	1. เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สามารถแก้ไขปัญหาและข้อจำกัดในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งได้ 2. การออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งเพื่อการก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของเทคโนโลยี 3. รูปทรงเปลือกโค้ง (shell) เป็นรูปทรงที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบให้ศาลาอเนกประสงค์สามารถคงรูปอยู่ได้ด้วยตัวเอง 4. การก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์จะต้องดำเนินการอย่างเป็นขั้นตอนตามที่กำหนดไว้ จึงจะมีความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง 5. ต้นทุนการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการขึ้นรูปชิ้นส่วนของศาลาอเนกประสงค์ มีความใกล้เคียงกับการใช้เทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูป

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษามีขอบเขตคือการศึกษาปัญหาที่พบในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง เพื่อหาแนวทางแก้ไขด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ซึ่งในการศึกษาแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งเนื้อหาได้ดังนี้

2.1 กระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง

2.1.1 การก่อโครงและฉาบคอนกรีต (traditional way)

2.1.2 การหล่อในที่ (Cast in Place)

2.1.3 การหล่อขึ้นรูปสำเร็จ (Molding)

2.2 ทฤษฎีการสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง

2.3.1 แนวคิดของโครงสร้างเชิงเส้นโค้ง (The Concept of Curvilinearity in Structuring)

2.3.2 ความโค้ง (Curvatures)

2.3.3 การสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง

2.3 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

2.3.1 ที่มาของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

2.3.2 ประเภทของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

2.3.3 หลักการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติระบบ FDM

2.4 กรณีศึกษาศาลาขนาดเล็กที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ

2.5.1 Silky Concrete Project: Massive Concrete Installation

2.5.2 Vulcan: World’s Largest 3D Printed Pavilion

2.1 กระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง

เทคโนโลยีในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งหรือรูปทรงอิสระด้วยวัสดุคอนกรีต ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีจะมีกระบวนการทำงานที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 การก่อโครงและฉาบ (traditional way)

เป็นการก่อสร้างสถาปัตยกรรมคอนกรีตรูปทรงอิสระแบบดั้งเดิม ใช้ฝีมือคนในการขึ้นรูปโครงเหล็กให้เป็นรูปทรงตามที่ต้องการ แล้วฉาบคอนกรีตเหลวลงบนโครงเหล็กที่ขึ้นรูปไว้เพื่อให้ได้รูปทรงตามโครงเหล็ก วิธีขึ้นรูปแบบนี้มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนของรูปทรงชิ้นงานคอนกรีตสูง และคุณภาพงานที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเป็นการใช้ฝีมือมนุษย์ในการทำทั้งหมด

ภาพที่ 2.1 การก่อโครงและฉาบคอนกรีตเพื่อสร้างผนังอาคาร. จาก http://www.greenhomebuilding.com/images/articles/bobgarber.jpg, 2011

แม้ว่าจะมีการนำเอาเทคโนโลยีการพ่นคอนกรีตเข้ามาช่วยในกระบวนการก่อสร้าง โดยใช้เครื่องพ่นคอนกรีตฉีดคอนกรีตเข้ากับโครงเหล็กเพื่อให้คอนกรีตจับตัวตามรูปทรงของโครงเหล็ก ซึ่งสามารถช่วยให้การทำงานเร็วขึ้น สะดวกขึ้น แต่ก็ยังคงได้คุณภาพงานที่ไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกับการฉาบด้วยมือ และยังคงมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนของรูปทรงชิ้นงานสูง

ภาพที่ 2.2 การก่อโครงและฉีดพ่นคอนกรีตเพื่อสร้างผนังอาคาร. จาก http://www.knowlesindustrial.com/wp-content/uploads/shotcrete-gunite-11.jpg, 2013

ภาพที่ 2.3 การก่อโครงและฉีดพ่นคอนกรีตเพื่อสร้างผนังอาคาร. จาก http://www.novocon.co.nz/images/products/shotcrete3.jpg, 2012

2.1.2 การหล่อในที่ (Cast in Place)

เป็นการก่อสร้างสถาปัตยกรรมคอนกรีตรูปทรงอิสระแบบหล่อในที่ โดยการงานออกเป็นหลายส่วนแล้วใช้ไม้แบบวางเพื่อขึ้นรูปงานคอนกรีตที่เป็นรูปทรงอิสระ จากนั้นจึงวางโครงเหล็กแล้วเทคอนกรีตลงในไม้แบบและฉาบด้วยฝีมือมนุษย์ วิธีขึ้นรูปแบบนี้มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนของรูปทรงชิ้นงานคอนกรีตน้อย และคุณภาพงานที่ได้มีความสม่ำเสมอมากกว่า เนื่องจากมีไม้แบบในการควบคุมรูปทรงชิ้นงานคอนกรีตให้ได้มาตรฐาน

ภาพที่ 2.4 การหล่อในที่เพื่อสร้างลานสเก็ตบอร์ดในรัฐแคลิฟอร์เนีย. จาก http://californiaskateparks.com/wp-content/uploads/2013/11/DSC2609.jpg, 2014

2.1.3 การหล่อขึ้นรูปสำเร็จ (Molding)

เป็นเทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานคอนกรีตรูปทรงอิสระที่ใช้แม่พิมพ์ในการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานคอนกรีต เป็นวิธีการหล่อขึ้นรูปที่มีความแม่นยำสูง เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยมาก และได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ แต่มีข้อจำกัดคือต้องทำในโรงงานเท่านั้น

ภาพที่ 2.5 การหล่อขึ้นรูปสำเร็จชิ้นส่วนของอาคาร. จาก http://static.concretenetwork.com/photo-gallery/images/675x529Max/outdoor-furniture_17/table-mold-buddy-rhodes-concrete-products_4889.jpg, 2015

ตารางที่ 2.1

เปรียบเทียบการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงอิสระด้วยวัสดุคอนกรีต 3 วิธี

	การก่อโครงและฉาบ	การหล่อในที่	การหล่อขึ้นรูปสำเร็จ
ขั้นตอน	1. ผสมคอนกรีต 2. ขึ้นโครงเหล็ก 3. ฉาบ/ฉีดพ่นคอนกรีต 4. บ่มคอนกรีต	1. ผสมคอนกรีต 2. เตรียมไม้แบบ 3. ผูกเหล็ก 4. เทคอนกรีต 5. บ่มคอนกรีต 6. ถอดไม้แบบ	1. ทำแม่พิมพ์ 2. ผสมคอนกรีต 3. เทคอนกรีตลงในแม่พิมพ์ 4. บ่มคอนกรีต 5. ถอดแม่พิมพ์ 6. ขนส่งชิ้นงาน 7. ประกอบชิ้นงาน
ความแม่นยำ	ความคลาดเคลื่อนสูง	ความคลาดเคลื่อนต่ำ	ความคลาดเคลื่อนต่ำมาก
คุณภาพงาน	หยาบ	ละเอียด	ละเอียดมาก

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

กระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงอิสระด้วยวัสดุคอนกรีตแต่ละวิธี จะมีกระบวนการและขั้นตอนการทำงานที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละกระบวนการจะมีระยะเวลาการทำงานที่ไม่เท่ากันและมีความยุ่งยากในการทำงานที่ไม่เหมือนกัน ผลที่ได้จากแต่ละวิธีคืองานคอนกรีตที่มีความแม่นยำและคุณภาพของงานที่แตกต่างกัน แม้ว่าการก่อโครงและฉาบเป็นวิธีที่มีขั้นตอนการทำงานน้อยที่สุด แต่ก็มีความยากลำบากในการทำงานมากเนื่องจากต้องใช้แรงงานคนในการก่อและฉาบ และทำให้ได้งานคอนกรีตที่หยาบและมีความคลาดเคลื่อนสูง ในขณะที่วิธีการหล่อขึ้นรูปสำเร็จจะมีขั้นตอนการทำงานที่มากกว่า ใช้เวลาในการขึ้นรูปชิ้นงานคอนกรีตมากกว่าเนื่องจากต้องทำแม่พิมพ์และหล่อขึ้นรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์ แต่ก็ทำให้กระบวนการทำงานที่หน้างานมีความง่ายขึ้น เพียงแค่นำชิ้นงานที่หล่อขึ้นรูปสำเร็จมาประกอบกันเท่านั้น และยังทำให้ได้งานคอนกรีตที่มีคุณภาพสูงอีกด้วย

จากการศึกษาเทคโนโลยีการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งหรือรูปทรงอิสระด้วยวัสดุคอนกรีต สามารถสรุปข้อดีและปัญหาของเทคโนโลยีการก่อสร้างแต่ละวิธีได้ดังนี้

1. การก่อโครงและฉาบ

ข้อดี: ขั้นตอนการก่อสร้างน้อย ทำงานเฉพาะหน้างานเท่านั้น

ปัญหา: ได้งานคอนกรีตที่หยาบและมีความคลาดเคลื่อนสูง ทำงานยากลำบาก

2. การหล่อในที่

ข้อดี: ได้งานคอนกรีตทีมีความละเอียดและมีความคลาดเคลื่อนน้อย

ปัญหา: มีขั้นตอนการก่อสร้างมากขึ้น การทำงานมีความยากลำบาก ไม้แบบกลายเป็นขยะจากกระบวนการก่อสร้าง

3. การหล่อขึ้นรูปสำเร็จ

ข้อดี: ได้งานคอนกรีตทีมีความละเอียดสูงและมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก

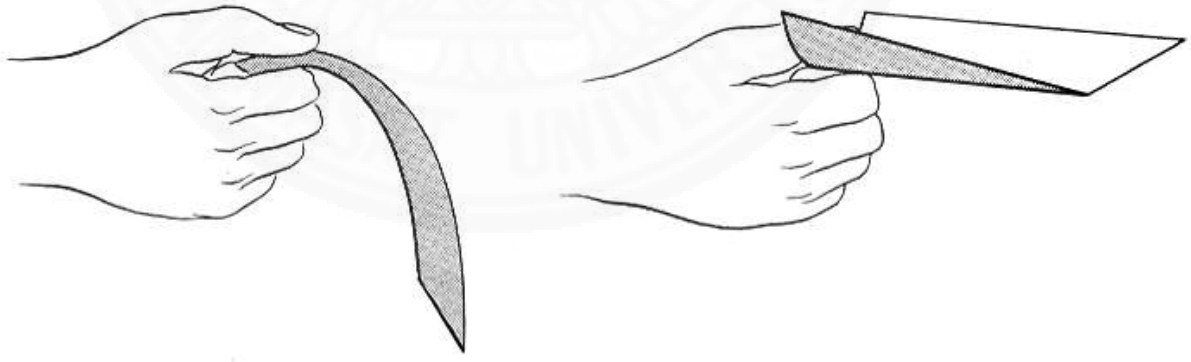
ปัญหา: มีขั้นตอนการก่อสร้างมากขึ้น ต้องเตรียมการหล่อชิ้นงานคอนกรีตสำเร็จในโรงงานเท่านั้น ต้องขนส่งชิ้นงานคอนกรีตจากโรงงานไปยังพื้นที่ก่อสร้าง แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปกลายเป็นขยะจากกระบวนการก่อสร้าง

2.2 ทฤษฎีการสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง

ทฤษฎีรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งที่ใช้ในการศึกษา นำมาจากงานวิจัย An Appraisal Of Curvilinear Form In Architecture With An Emphasis On Structural Behavior (Tuba, 2007) โดยศึกษาแนวคิดพื้นฐานในการสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งให้มีความสามารถในเชิงโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวได้กล่าวถึงหลักการไว้ดังนี้

2.2.1 แนวคิดของโครงสร้างเชิงเส้นโค้ง (The Concept of Curvilinearity in Structuring)

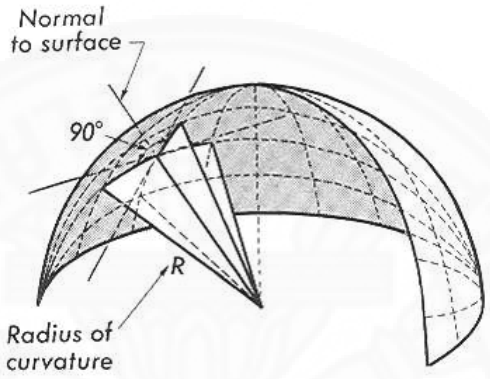
หลักการพื้นฐานของโครงสร้างเชิงเส้นโค้งสามารถอธิบายให้เข้าใจโดยง่ายได้ด้วยแผ่นกระดาษ เมื่อถือแผ่นกระดาษไว้ในมือ แผ่นกระดาษจะโค้งงอและไม่สามารถต้านทานน้ำหนักของตัวมันเองได้ แต่เมื่อแผ่นกระดาษได้รับแรงกดจากนิ้วมือในบริเวณแกนกลางของแผ่นกระดาษ มันจะสามารถคงรูปอยู่ได้และยังสามารถรับน้ำหนักได้อีกเล็กน้อย ความโค้งในแผ่นกระดาษจะก่อให้เกิดความแข็งและความสามารถในการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ความสามารถเหล่านี้ไม่ได้เกิดจากการเพิ่มปริมาณวัสดุที่ใช้ในการสร้างรูปทรง แต่การสร้างรูปทรงเชิงเส้นโค้งที่เหมาะสมจะทำให้เกิดเป็นโครงสร้างต้านทานรูปทรง (form-resistant structures) ซึ่งทำให้วัสดุสามารถคงรูปและรับน้ำหนักได้มากขึ้น



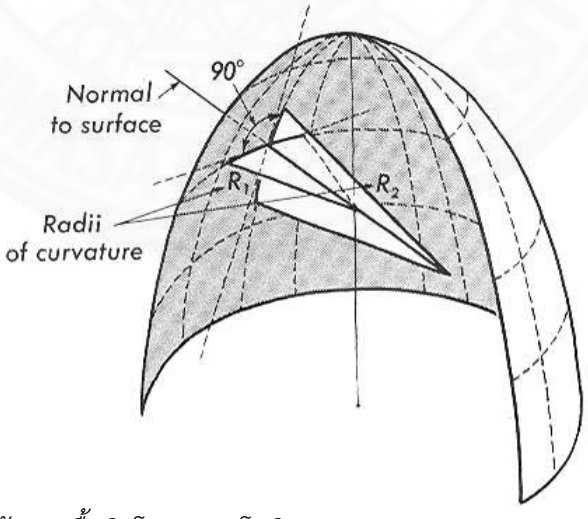
ภาพที่ 2.6 การใช้กระดาษแสดงหลักการของโครงสร้างต้านทานรูปทรง. จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.

2.2.2 ความโค้ง (Curvatures)

ในรูปทรงเชิงเส้นโค้งใด ๆ ล้วนมี “ความโค้ง” อยู่ทั้งสิ้น ความโค้งบนพื้นผิว (surface) ของรูปทรงที่จุดใด ๆ สามารถแสดงได้โดยการนำระนาบ (plane) ไปตัดและหมุนในตำแหน่งนั้นบนพื้นผิว การตัดกันของระนาบ (plane) และพื้นผิว (surface) ที่มีความโค้ง จะได้เป็นเส้นโค้งที่มีความโค้งมาก-น้อยตามความโค้งบนพื้นผิวนั้น โดมทรงกลมจะมีความโค้งในแต่ละจุดเท่ากัน และสำหรับโดมรูปแบบอื่น ความโค้งจะเปลี่ยนแปลงจากมากไปหาน้อยหรือน้อยไปหามากตามการหมุนของระนาบ

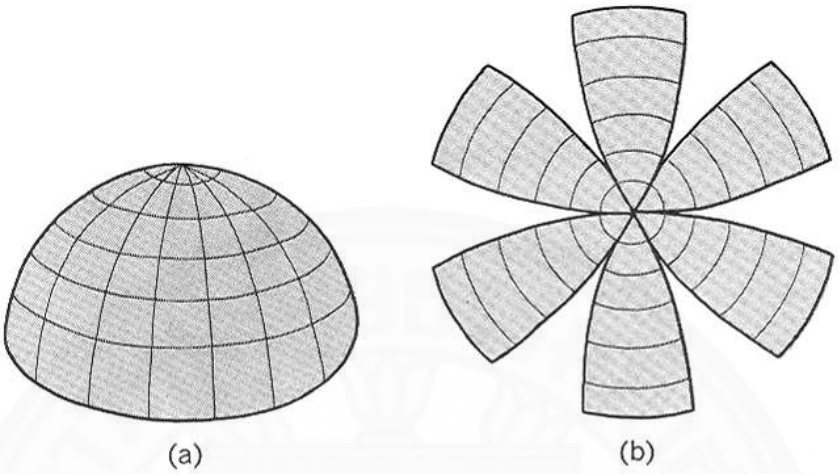


ภาพที่ 2.7 การวัดความโค้งของพื้นผิวโดมทรงกลม. จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.



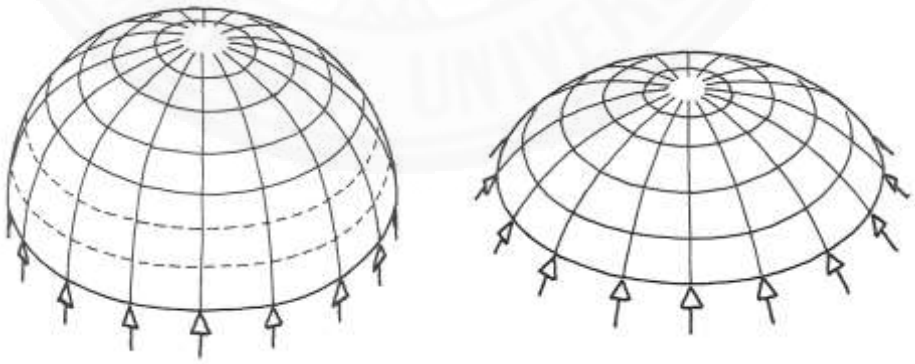
ภาพที่ 2.8 การวัดความโค้งของพื้นผิวโดมพาลาโบลิค. จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.

พื้นผิวของโดมที่มีค่าความโค้งในแต่ละจุดเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน (มากขึ้นหรือน้อยลง) จะเรียกว่าพื้นผิว synclastic ซึ่งรูปทรงประเภทนี้จะเป็นรูปทรงที่มีความแข็งแรงโดยธรรมชาติมากที่สุด



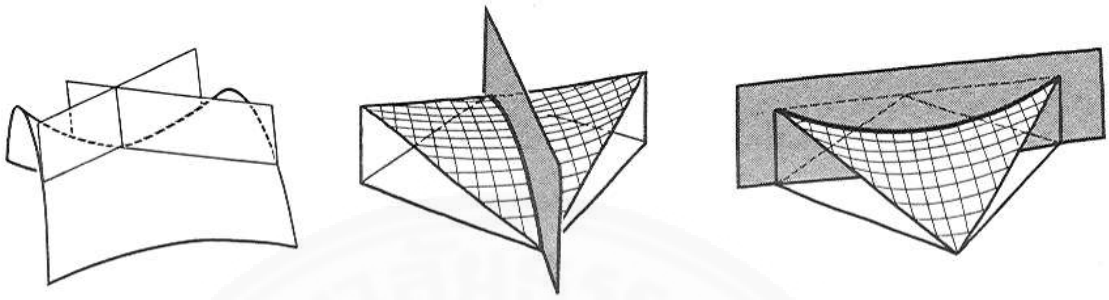
ภาพที่ 2.9 การคลี่พื้นผิวที่มีคุณสมบัติแบบ synclastic ของโดมทรงกลม. จาก *Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.*

รูปทรงเปลือกโค้งแบบโดมที่มีส่วนฐานต่อเนื่องกัน จะทำให้เกิดการถ่ายเทน้ำหนักภายในรูปทรง และจะถูกแบบรับไว้ด้วยแรงอัดภายในทั้งหมด หรือถูกแบบรับไว้ด้วยแรงอัดและแรงดึงผสมผสานกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานรูปทรงและบริบทที่แตกต่างกันไป

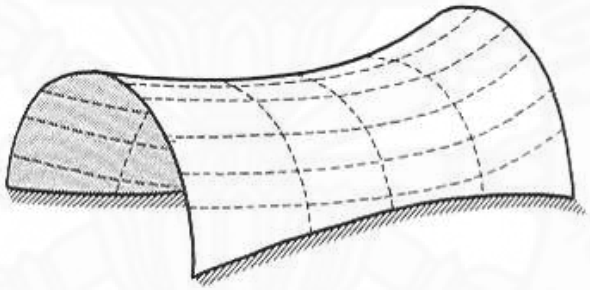


ภาพที่ 2.10 เส้นทึบแสดงแรงอัดและเส้นประแสดงแรงดึงภายในรูปทรงเปลือกโค้งแบบโดม. จาก *Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.*

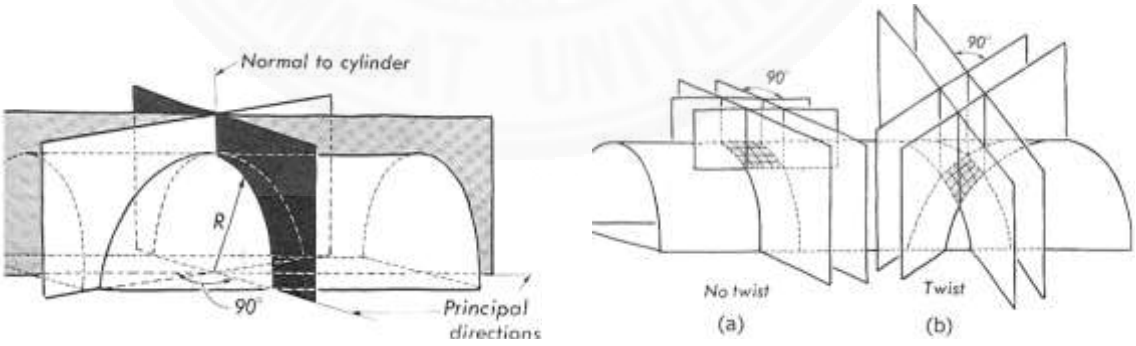
พื้นผิวแบบอานม้าเป็นพื้นผิวที่มีค่าความโค้งที่ค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงจากค่าบวกไปเป็นค่าลบ เป็นพื้นผิวที่มีความโค้ง 2 ทิศทาง พื้นผิวประเภทนี้จะเรียกว่าพื้นผิว anticlastic ซึ่งเป็นพื้นผิวที่ไม่สามารถคลี่ให้เป็นแผ่นแบนราบบนระนาบได้



ภาพที่ 2.11 การวัดความโค้งบนพื้นผิวแบบอานม้า. จาก *Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.*



ภาพที่ 2.12 เส้นโค้งที่อยู่ในพื้นผิวแบบอานม้า. จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.



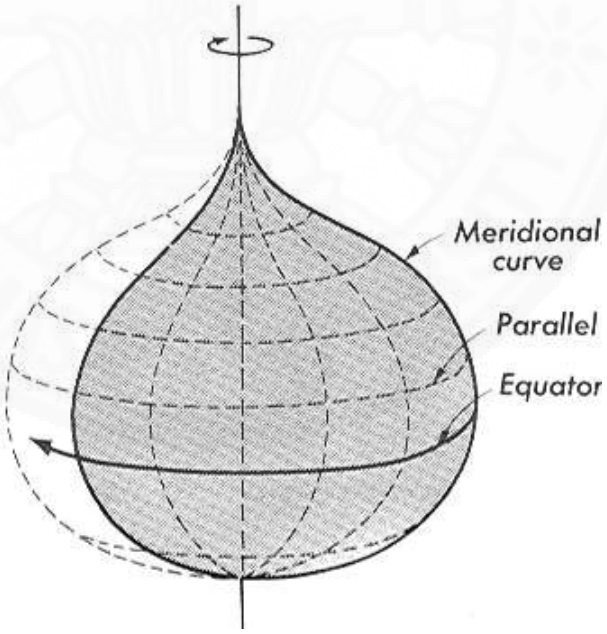
ภาพที่ 2.13 การวัดความโค้งบนพื้นผิวของทรงกระบอกปกติและทรงกระบอกแบบบิด. จาก *Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.*

2.2.3 การสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง

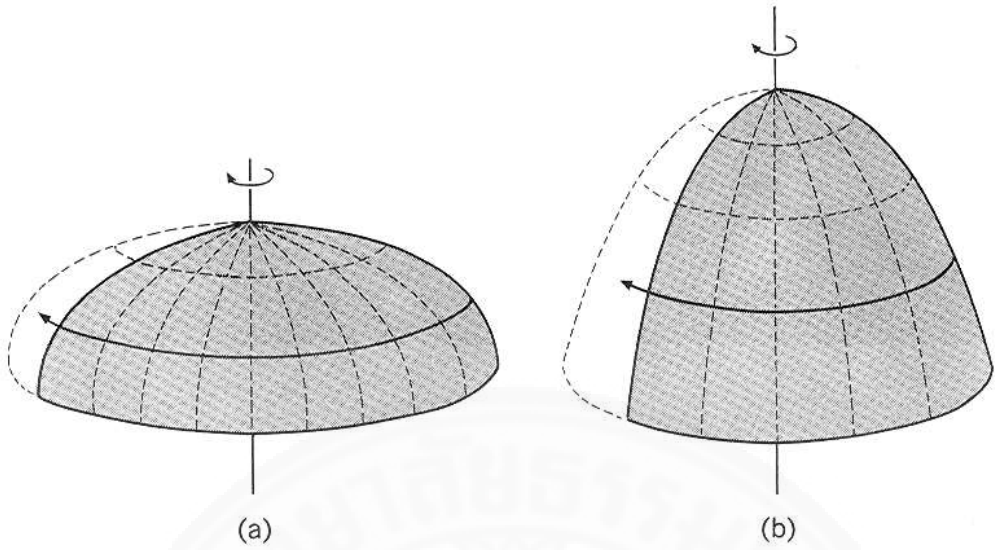
หากจะสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งรูปแบบต่าง ๆ สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงที่ต้องการจะสร้าง โดยสามารถจำแนกวิธีการขั้นสร้างพื้นฐานได้ 3 วิธีดังนี้

2.2.3.1 การสร้างผิวโค้งจากการหมุนเส้นโค้งรอบแกน (Rotational Surfaces)

ผิวโค้งจากการหมุนเส้นโค้งรอบแกน (Rotational Surfaces) เกิดจากการหมุนของเส้นโค้ง (curve) รอบแกนแนวตั้งที่เป็นแกนอ้างอิงจุดหมุน เส้นโค้งหลากหลายรูปแบบสามารถสร้างรูปทรงได้หลากหลายรูปแบบเช่นกัน โดมที่ถูกใช้ในงานสถาปัตยกรรมบ่อยที่สุดคือโดมทรงกลม (spherical dome) ซึ่งเกิดจากการหมุนของเส้นโค้งครึ่งวงกลมรอบแกนแนวตั้ง เกิดเป็นพื้นผิวครึ่งทรงกลม โดมทรงวงรี (elliptical dome) เกิดจากการหมุนของเส้นโค้งครึ่งวงรี จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าโดมทรงกลม เนื่องจากส่วนบนของโดมจะแบนราบกว่า ความโค้งที่ลดลงนี้จะส่งผลให้ความสามารถในการคงรูปของโดมทรงวงรีลดลงและมีโอกาสที่จะพังทลายลงได้ง่ายกว่าโดมทรงกลม ในขณะที่โดมแบบพาราโบลิค (parabolic dome) จะมีส่วนบนบนที่แหลมกว่า และมีศักยภาพเชิงโครงสร้างในถ่ายเทแรงอัดมากกว่าโดมทรงกลม

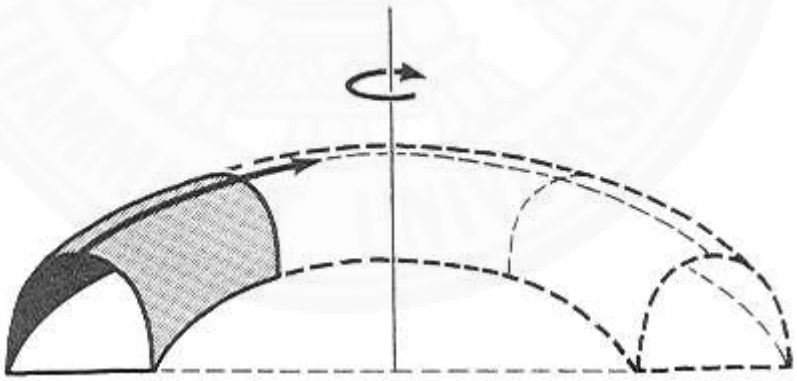


ภาพที่ 2.14 ผิวโค้งจากการหมุนเส้นโค้งรอบแกน (Rotational Surfaces). จาก *Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.*



ภาพที่ 2.15 ผิวโค้งจากการหมุนเส้นโค้งรอบแกน (Rotational Surfaces). จาก *Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.*

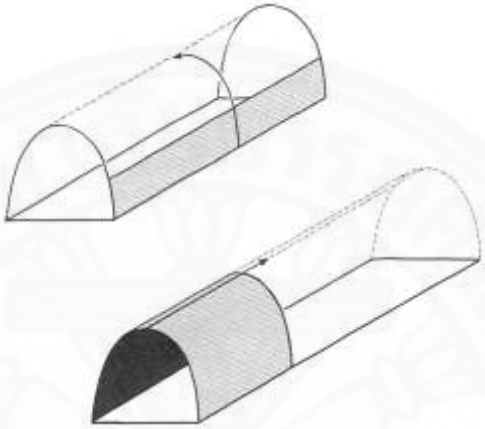
นอกจากนี้ หลักการสร้างผิวโค้งจากการหมุนเส้นโค้งรอบแกนสามารถนำมาใช้การสร้างทรงกระบอกแบบโค้งได้ โดยจะเป็นการหมุนเส้นโค้งรอบแกน โดยที่ในการหมุนนี้ เส้นโค้งจะไม่ซ้อนทับกับแกนแนวตั้งที่ใช้เป็นจุดหมุน รูปทรงประเภทนี้สามารถถูกเรียกว่า ห่วง (torus) ก็ได้เช่นกัน



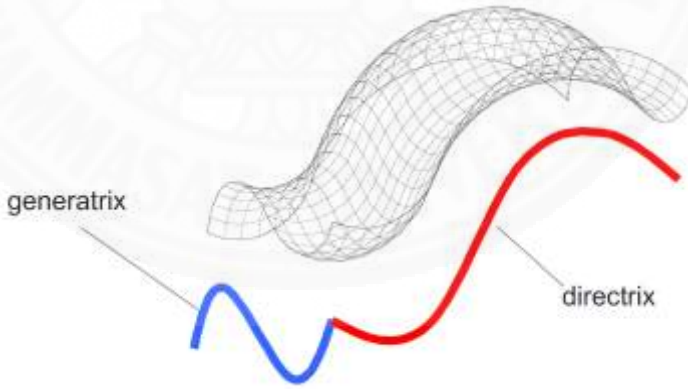
ภาพที่ 2.16 ผิวโค้งจากการหมุนเส้นโค้งรอบแกน (Rotational Surfaces). จาก *Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.*

2.2.3.2 การสร้างผิวโค้งจากการเลื่อนระนาบเส้น (Translational Surfaces)

ผิวโค้งจากการเลื่อนระนาบเส้น (Translational Surfaces) เกิดจากระนาบเส้นโค้ง (generatrix) ที่ถูกเลื่อนไปบนเส้นอ้างอิง (directrix) โดยเริ่มต้นจากปลายด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง การสร้างพื้นผิวทรงกระบอก (Cylindrical Surfaces) สามารถทำได้โดยการเลื่อนระนาบเส้นโค้งครึ่งวงกลมไปตามแนวเส้นอ้างอิงที่เป็นเส้นตรง รูปแบบของพื้นผิวที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นโค้งที่ถูกเลื่อนและเส้นอ้างอิงที่ถูกใช้เป็นแนวในการเลื่อน

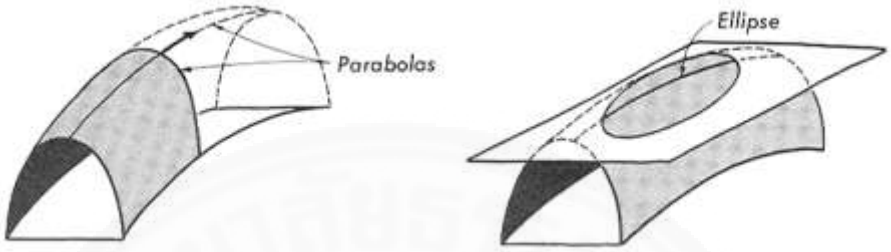


ภาพที่ 2.17 การสร้างพื้นผิวทรงกระบอก (Cylindrical Surfaces). จาก *Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.*



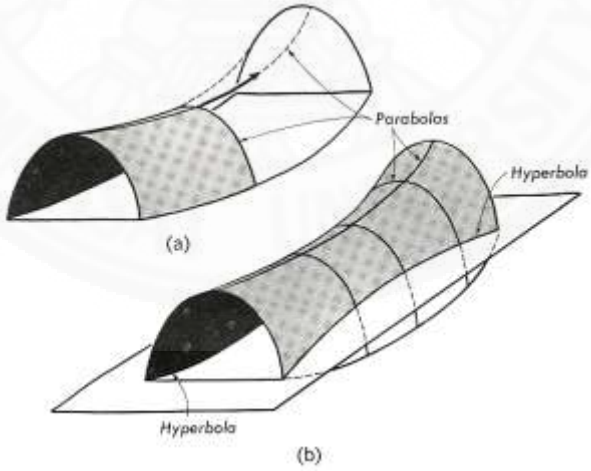
ภาพที่ 2.18 การสร้างพื้นผิวโค้งจากหลักการ Translational Surfaces. จาก *A Parametric Strategy for Freeform Glass Structures Using Quadrilateral Planar Facet, J. Glymph, D. Shelden, C. Ceccato, J. Mussel, 2004, Santa Monica, California: Gehry Partners, LLP.*

หากใช้เส้นอ้างอิงเป็นเส้นโค้งพาลาโบร่า (parabola) พื้นผิวโค้งที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นผิวแบบพาลาโบลอย (paraboloid) และเมื่อนำระนาบมาตัดพื้นผิวพาราโบลอยในแนวนอน จะได้พื้นผิวที่มีเส้นขอบเป็นวงรี (elliptic) เรียกว่า elliptic paraboloid ซึ่งเป็นรูปทรงที่มักถูกนำไปใช้ในการสร้างหลังคาคอนกรีตเสริมแรงรูปทรงเปลือกโค้ง



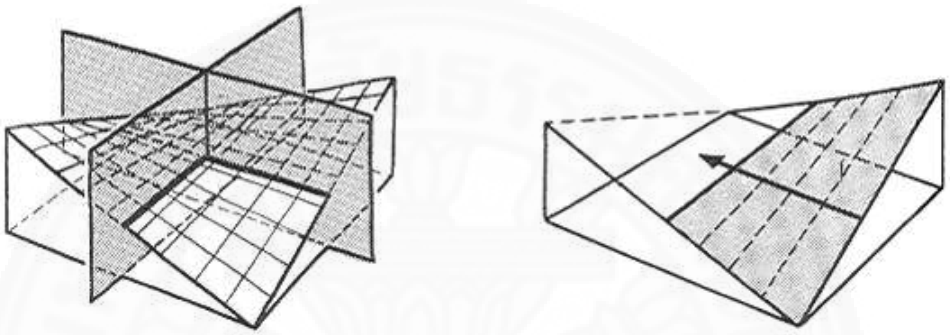
ภาพที่ 2.19 การสร้างพื้นผิวแบบพาลาโบลอย (paraboloid) และการสร้างพื้นผิววงรี (elliptic paraboloid). จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.

และหากใช้เส้นโค้งพาลาโบร่า (parabola) ในทิศทางกลับกันเป็นเส้นอ้างอิง พื้นผิวโค้งที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นผิวแบบไฮเปอร์โบลิคพาลาโบลอย (hyperbolic paraboloid) และเมื่อนำระนาบมาตัดพื้นผิวไฮเปอร์โบลิคพาราโบลอยในแนวนอน จะได้พื้นผิวที่มีเส้นขอบแบบไฮเปอร์โบล่า (hyperbola)

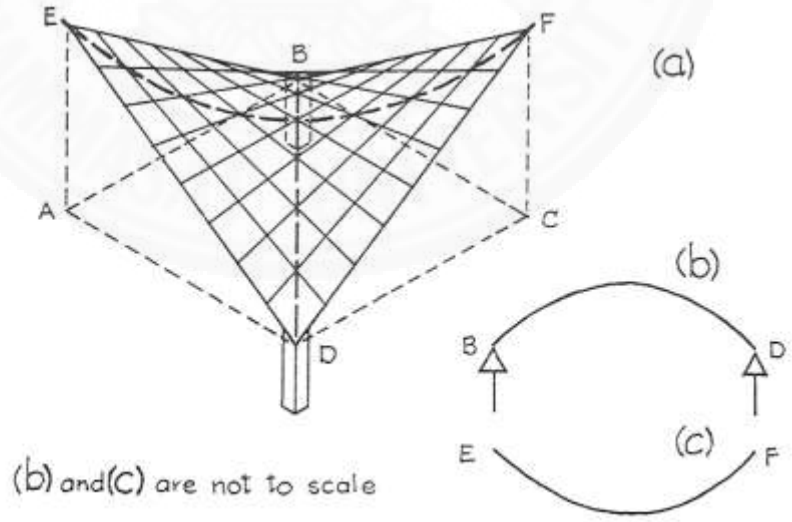


ภาพที่ 2.20 การสร้างพื้นผิวแบบไฮเปอร์โบลิคพาลาโบลอย (hyperbolic paraboloid). จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.

นอกจากนี้ หลักการของไฮเปอร์โบลิคพาลาโบลอย (hyperbolic paraboloid) ยังสามารถนำมาใช้ในการสร้างพื้นผิวโค้งจากเส้นตรงได้ด้วย ซึ่งทำได้โดยการเลื่อนเส้นตรงจากส่วนต้นและส่วนปลายของเส้นไปตามเส้นตรงอีก 2 เส้นที่แยกกัน โดยที่เส้นตรงทั้ง 2 เส้นนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกัน เมื่อเลื่อนเส้นตรงไปตามเส้นทั้ง 2 เส้น จะเกิดเป็นพื้นผิวโค้งแบบไฮเปอร์โบลิคพาลาโบลอย (hyperbolic paraboloid) เช่นกัน หรืออาจเรียกในอีกชื่อเฉพาะสำหรับพื้นผิวรูปแบบนี้ได้ว่าพื้นผิวเชิงบรรทัด (ruled surfaces)

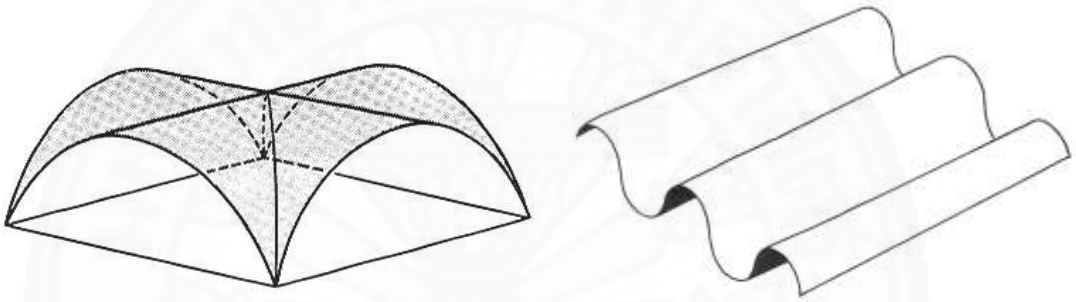


ภาพที่ 2.21 การสร้างพื้นผิวเชิงบรรทัด (ruled surfaces). จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.

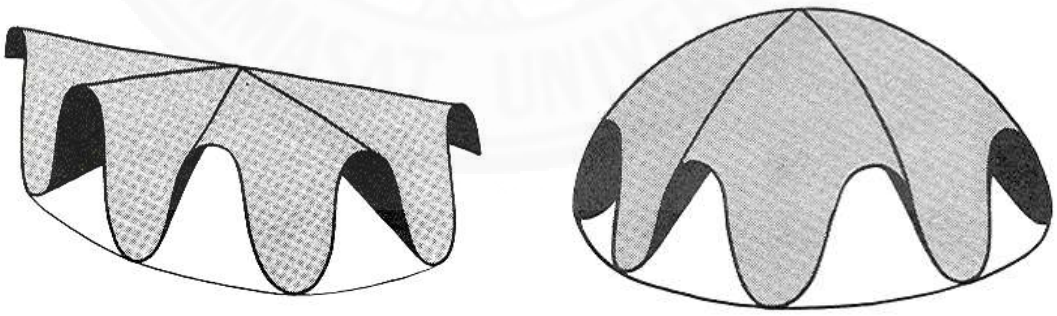


ภาพที่ 2.22 พื้นผิวเชิงบรรทัด (ruled surfaces). จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.

การสร้างพื้นผิวโค้งรูปแบบอื่นล้วนมีหลักการพื้นฐานมาจากทั้ง 2 หลักการข้างต้น ซึ่งสามารถเกิดขึ้นจากการนำหลักการไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่าง ๆ นอกจากนี้การนำพื้นผิวที่เกิดขึ้นมาตัดหรือเชื่อมต่อกัน จะทำให้พื้นผิวมีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การตัดพื้นผิวทรงกระบอกออกแล้วนำมาเชื่อมต่อกัน 4 ส่วน จะเกิดเป็นพื้นผิวโค้งที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ groined vault หรือการใช้เส้นโค้งแบบลอนคลื่นเลื่อนไปตามเส้นอ้างอิง จะเกิดเป็นพื้นผิวแบบลอนคลื่น (undulated plane) หากนำพื้นผิวแบบลอนคลื่นนี้มาพับในลักษณะเดียวกับทรงกรวย จะเกิดเป็นกรวยแบบลอนคลื่น (undulated conical surface) และหากนำไปหมุนรอบแกนอ้างอิงแนวตั้ง จะเกิดเป็นรูปทรงโดมที่มีขอบเป็นลอนคลื่นขึ้น (undulated spherical sector)



ภาพที่ 2.23 groined vault และ undulated plane. จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.



ภาพที่ 2.24 undulated conical surface และ undulated spherical sector. จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.

2.3 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ คือ ระบบการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุซีเมนต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ทำงานโดยสั่งการเครื่องพิมพ์สามมิติผ่านคอมพิวเตอร์ ระบบการพิมพ์แบบนี้จะเป็นลักษณะของการแบ่งระนาบการพิมพ์เป็นชั้น ๆ เพื่อขึ้นรูป จนได้เป็นชิ้นงานสำเร็จเมื่อพิมพ์ครบทุกชั้น

2.3.1 ประเภทของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ในปัจจุบันมีอยู่ 2 ระบบด้วยกัน ได้แก่

2.3.1.1 Extrusion Deposition (FDM)

เป็นวิธีการพิมพ์โดยใช้หัวพิมพ์รีดครีมเหลวที่สามารถเซ็ทตัวได้ ขณะพิมพ์ออกมาที่แท่นพิมพ์หรือหน้างานจริง การขึ้นรูปสามมิติวิธีนี้อาศัยการซ้อนทับของวัสดุพิมพ์ทีละชั้นตามแบบที่สั่งพิมพ์โดยระบบคอมพิวเตอร์ ขนาดของเครื่องพิมพ์มีความหลากหลาย สามารถพิมพ์ได้ตั้งแต่ชิ้นงานขนาดเล็กไปจนถึงอาคารขนาดใหญ่ แต่ลักษณะคุณภาพของพื้นผิวที่พิมพ์ขึ้นรูปจะมีความละเอียดไม่มาก ผิวจะเป็นลักษณะชั้น ๆ ซ้อนกันขึ้นไป ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด วัสดุที่สามารถพิมพ์ขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์นี้ ต้องเป็น วัสดุที่ทำสามารถหลอมละลายด้วยความร้อนและแข็งตัวได้ เมื่ออุณหภูมิของวัสดุลดลง เช่น โพลีเมอร์ ซีเมนต์ เป็นต้น

ภาพที่ 2.25 ตัวอย่างชิ้นงานซีเมนต์ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ Extrusion Deposition (FDM). จาก http://www.domusweb.it/content/dam/domusweb/en/news/2014/12/01/_3d_concrete_printing/domus-02-3d-concrete.jpg, 2015

ข้อดี

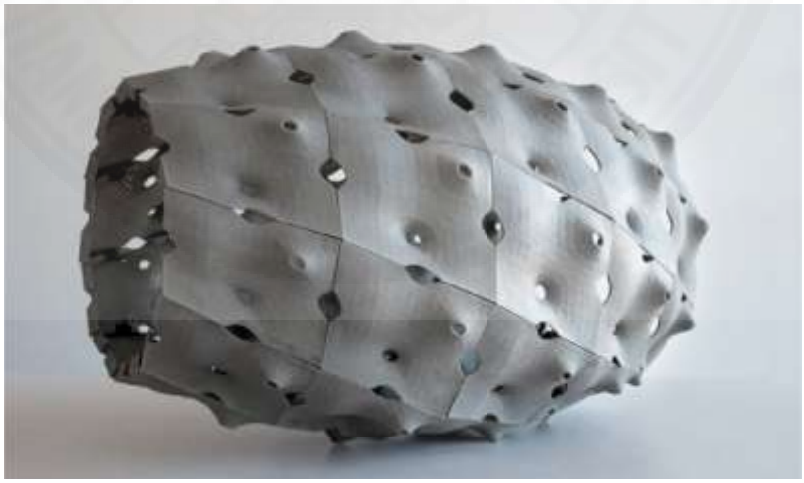
- สามารถขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ได้และขึ้นรูปหน้างานได้
- ใช้เวลาในการขึ้นรูปไม่นาน ลดระยะเวลาในการทำงานได้

ข้อจำกัด

- พื้นผิวชิ้นงานจะไม่เรียบ มีลักษณะเป็นชั้น
- ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความละเอียดซับซ้อนสูงได้
- เศษวัสดุที่เหลือจากการขึ้นรูปไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.3.1.2 Powder Bed and Inkjet Head (SLS)

เป็นการนำผงวัสดุมาปาดเรียบเป็นชั้นบาง ๆ บนถาดหรือแท่นพิมพ์ หัวพิมพ์จะถูกสั่งให้พิมพ์ตามโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยการพ่นหมึกที่เป็นสารเคมี ความร้อน หรือแม้กระทั่งเลเซอร์ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับผงวัสดุให้เกิดการแข็งตัวตามแนวที่กำหนดไว้ในแต่ละชั้น จากนั้นระบบการพิมพ์จะย้อนกลับไปเกลี่ยผงวัสดุ ใหม่อีกครั้งแล้วเริ่มกระบวนการทำงานในชั้นถัดไป จนชิ้นงานสำเร็จตามแบบ 3 มิติที่ออกแบบไว้ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติแบบนี้จะได้ชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง ทั้งนี้ความละเอียดของชิ้นงานที่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของหัวพิมพ์ ผงวัสดุที่นำมาใช้ในการพิมพ์มีอยู่หลายวัสดุด้วยกัน เนื่องจาก วัสดุส่วนมากสามารถผลิตเป็นผงได้ เช่น ผงโลหะไทเทเนียม เมเทิลอัลลอยด์ ผงพลาสติก ผงเซรามิก และผงซีเมนต์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.26 ตัวอย่างชิ้นงานซีเมนต์ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ Powder Bed and Inkjet Head (SLS). จาก http://www.emergingobjects.com/wp-content/uploads/2013/01/drum1.jpg, 2013

ข้อดี

- สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความละเอียดซับซ้อนมาก ๆ ได้
- เศษวัสดุที่เหลือจากการขึ้นรูปสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ข้อจำกัด

- ต้องขึ้นรูปบนแท่นพิมพ์ในโรงงานเท่านั้น
- ใช้เวลาขึ้นรูปนานกว่าการพิมพ์แบบ Extrusion Deposition (FDM)
- เครื่องจักรมีราคาแพงกว่าระบบ Extrusion Deposition (FDM)

ตารางที่ 2.2

เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของระบบการพิมพ์สามมิติ 2 ระบบ

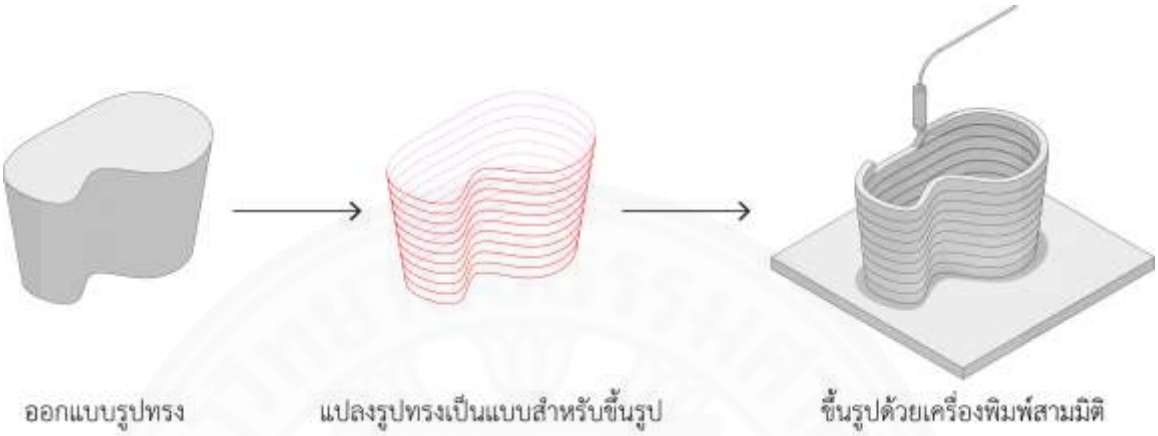
	Extrusion Deposition (FDM)	Powder Bed and Inkjet Head (SLS)
ข้อดี	- ขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ได้ - ขึ้นรูปชิ้นงานหน้างานได้ - ขึ้นรูปชิ้นงานได้เร็ว - เครื่องจักรมีราคาถูกกว่าระบบการพิมพ์แบบ Powder Bed and Inkjet Head (SLS)	- ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงได้ - เศษวัสดุที่เหลือจากการขึ้นรูปสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
ข้อจำกัด	- พื้นผิวชิ้นงานจะไม่เรียบ มีลักษณะเป็นชั้น ๆ - ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงไม่ได้ - เศษวัสดุที่เหลือจากการขึ้นรูปไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้	- ต้องขึ้นรูปบนแท่นพิมพ์ในโรงงานเท่านั้น - ใช้เวลาขึ้นรูปนานกว่าการพิมพ์แบบ Extrusion Deposition (FDM) - เครื่องจักรมีราคาแพงกว่าระบบการพิมพ์แบบ Extrusion Deposition (FDM)

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติทั้ง 2 ระบบ มีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน แต่สำหรับโจทย์การออกแบบในงานวิจัยนี้ การใช้ระบบการพิมพ์สามมิติแบบ Extrusion Deposition (FDM) มีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้งานมากกว่า เนื่องจากเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ และมีต้นทุนของเทคโนโลยีที่ถูกกว่า อีกทั้งชิ้นงานขึ้นรูปไม่จำเป็นต้องมีความละเอียดสูงเนื่องจากต้องมีการเก็บความเรียบร้อยของงานหลังกระบวนการประกอบชิ้นงานอยู่แล้ว ซึ่งสามารถสร้างงานที่มีคุณภาพได้เช่นกัน

2.3.2 หลักการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติระบบ FDM

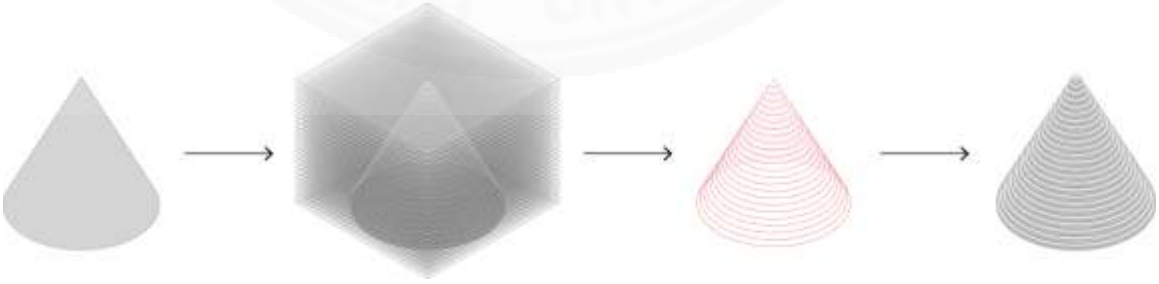
การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติจำเป็นต้องอาศัยความเข้าใจในหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติ เพื่อรับรู้ถึงกระบวนการและข้อจำกัดในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ หลักการขึ้นรูปมีกระบวนการดังนี้



ภาพที่ 2.27 หลักการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติระบบ FDM. โดย ผู้วิจัย, 2559

2.3.2.1 หลักการแปลงรูปทรงก่อนกระบวนการขึ้นรูป

รูปทรงใด ๆ ที่จะถูกนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติ จะต้องผ่านกระบวนการแปลงรูปทรงตามหลักการสร้างเส้น contour กระบวนการนี้เป็นการสร้างรูปทรงขึ้นใหม่อีกครั้ง ในลักษณะที่ถูกตัดแบ่งออกเป็นชั้น ๆ เพื่อให้รูปทรงมีความเหมาะสมที่จะขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ การตัดแบ่งรูปทรงในแต่ละชั้นเป็นการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีด ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ หัวฉีดจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ถูกกำหนดไว้พร้อมทั้งฉีดวัสดุออกมาในระหว่างการเคลื่อนที่ด้วย เพื่อหัวฉีดได้เคลื่อนที่และฉีดวัสดุได้ครบทุกชั้น ก็จะได้ชิ้นงานขึ้นรูปตามรูปทรงต้นฉบับ

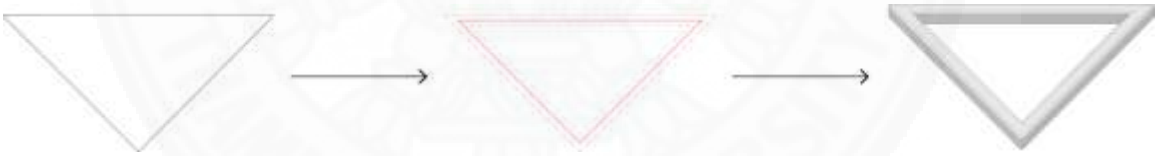


ภาพที่ 2.28 การแปลงรูปทรงตามหลักการสร้างเส้น contour. โดย ผู้วิจัย, 2559

ทั้งนี้ความละเอียดของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว ได้แก่ ขนาดของหัวฉีด และระยะความสูงระหว่างชั้นของการตัด contour โดยที่ความหลากหลายของตัวแปรจะทำให้ชิ้นงานมีความแตกต่างกันคือ หัวฉีดที่มีขนาดเล็กและระยะความสูงระหว่างชั้นที่ห่างกันน้อย จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความละเอียดมากกว่าหัวฉีดที่มีขนาดใหญ่และระยะความสูงระหว่างชั้นที่ห่างกันมาก

ภาพที่ 2.29 การขึ้นรูปโดยที่มีความสูงระหว่างชั้นห่างกันน้อย (ซ้าย) และห่างกันมาก (ขวา). โดย ผู้วิจัย, 2559

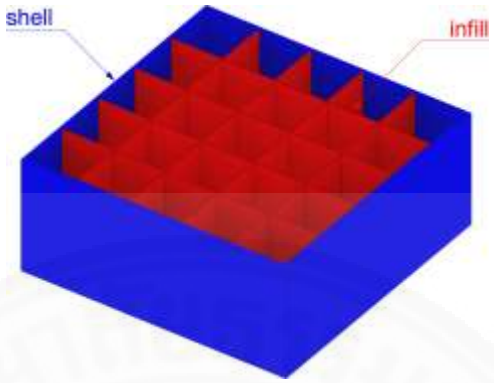
เส้นที่เกิดจากการตัดผ่านรูปทรงต้นแบบในแต่ละชั้นที่จะถูกนำมาใช้เป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีด จะต้องถูกนำมาหดเข้า (offset) ให้เส้นรอบรูปเล็กลงตามระยะรัศมีของหัวฉีด เพื่อชดเชยพื้นที่สำหรับวัสดุที่จะถูกฉีดออกมาในแต่ละชั้นให้มีขนาดเท่ากับเส้นรอบรูปเดิมที่เกิดจากการตัดผ่านรูปทรงต้นแบบ



ภาพที่ 2.30 การหด (offset) เส้นรอบรูปเพื่อชดเชยพื้นที่สำหรับ. โดย ผู้วิจัย, 2559

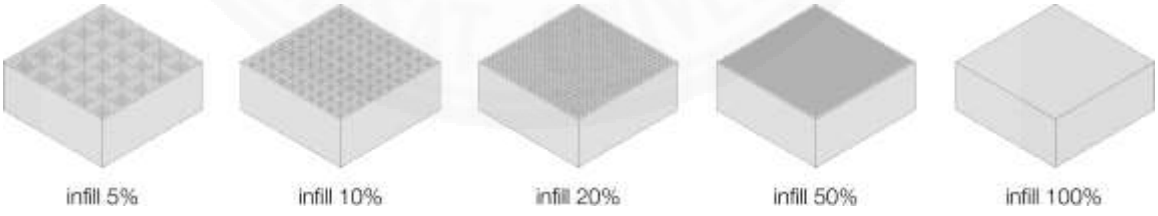
เมื่อรูปทรงที่มีความหนา (volume) ถูกแปลงเพื่อการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ความหนานั้นจะถูกแปลงเป็นรูปทรงที่ประกอบด้วยเปลือก (shell) และส่วนเติมเต็ม (infill) ซึ่งเป็นตัวแปร 2 ตัวที่มีผลต่อมวลความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยที่เปลือก (shell) คือกรอบของรูปทรง ความหนาของเปลือกจะนับได้เป็นจำนวนชั้น และส่วนเติมเต็ม (infill) คือไส้ในของรูปทรง ความหนาแน่นของส่วนเติมเต็มจะคิดเป็นเปอร์เซ็นจากมวลทั้งหมด ส่วนเติมเต็มที่น้อยกว่าจะทำให้รูปทรงมีมวลน้อยลงและมีน้ำหนักเบาลง เปอร์เซ็นของส่วนเติมเต็มมีผลโดยตรงกับมวลและความแข็งแรงของรูปทรง เปอร์เซ็นที่น้อยลงจะ

ทำให้มวลและความแข็งแรงของรูปทรงลดลงไปด้วย ทั้งนี้การออกแบบรูปแบบ (pattern) ของส่วนเติมเต็มภายในรูปทรงให้เหมาะสม จะสามารถช่วยในด้านความแข็งแรงของรูปทรงได้

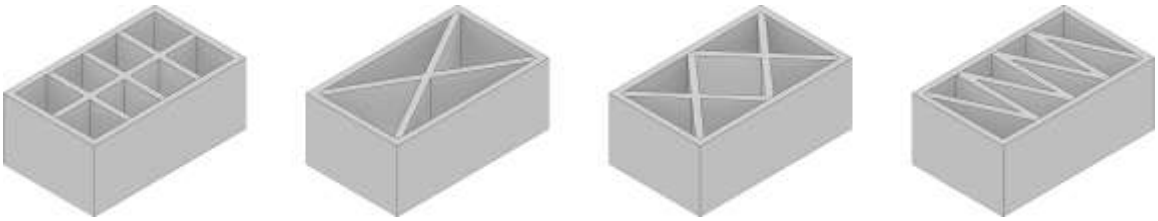


ภาพที่ 2.31 องค์ประกอบของรูปทรงที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 2.32 เปลือก (shell) ของรูปทรงที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน. โดย ผู้วิจัย, 2559

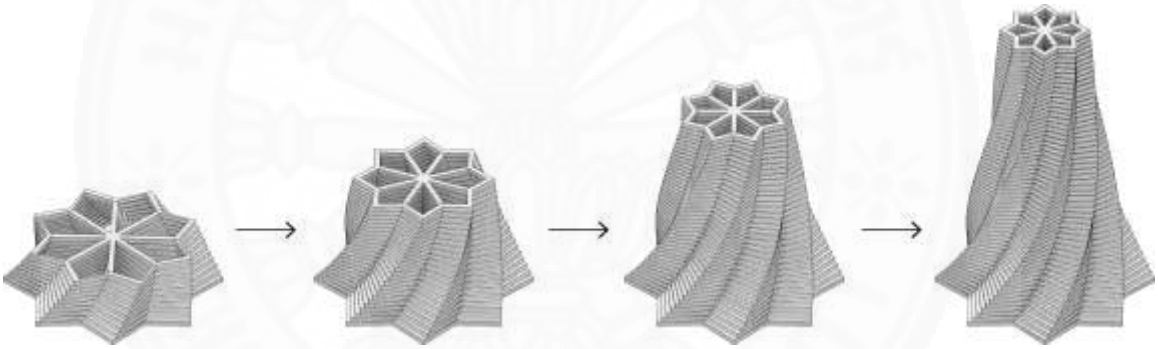


ภาพที่ 2.33 ส่วนเติมเต็ม (infill) ของรูปทรงที่มีเปอร์เซ็นความหนาแน่นแตกต่าง. โดย ผู้วิจัย, 2559



ภาพที่ 2.34 ความหลากหลายของรูปแบบ (pattern) ของส่วนเติมเต็ม (infill). โดย ผู้วิจัย, 2559

การออกแบบรูปแบบ (pattern) ของส่วนเติมเต็ม (infill) จะต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ในที่นี้คือเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดวัสดุในแต่ละชั้นและระหว่างชั้น ซึ่งต้องมีความเป็นไปได้ภายใต้ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของรูปแบบส่วนเติมเต็มในแต่ละชั้นด้วยเช่นกัน รูปทรงที่มีความเปลี่ยนแปลงในแต่ละชั้น ไม่ว่าจะเป็นขนาดหรือรูปทรงของเปลือก (shell) ส่วนเติมเต็มภายในจะต้องเปลี่ยนไปตามเปลือกด้วย เพื่อให้ส่วนเติมเต็มแต่ละชั้นมีความต่อเนื่องกัน



ภาพที่ 2.35 ขนาดของเปลือก (shell) และส่วนเติมเต็ม (infill) เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชั้น. โดย ผู้วิจัย, 2559

2.3.2.2 ข้อจำกัดของการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติระบบ FDM

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติระบบ FDM มีข้อจำกัดอยู่หลายประการด้วยกัน ซึ่งมีทั้งข้อจำกัดจากวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานของเครื่องพิมพ์สามมิติ และข้อจำกัดจากคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุประเภทซีเมนต์ที่มีสถานะเป็นของเหลวที่มีความหนืดและมีน้ำหนักค่อนข้างมาก ทำให้การขึ้นรูปชิ้นงานมีข้อจำกัดดังนี้

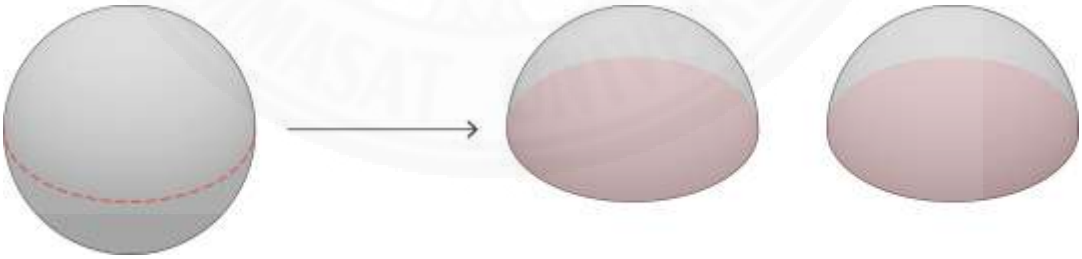
1. รูปทรงต้องถูกแปลงให้มีลักษณะเป็นชั้นก่อนการขึ้นรูป

ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติระบบ FDM จะต้องผ่านกระบวนการแปลงรูปทรงตามหลักการสร้างเส้น contour ซึ่งความละเอียดของชิ้นงานที่ได้จะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว ได้แก่ ขนาดของหัวฉีด และระยะความสูงระหว่างชั้นของการตัด contour

ภาพที่ 2.36 การแปลงรูปทรงให้มีลักษณะเป็นชั้น. โดย ผู้วิจัย, 2559

2. ชิ้นงานขึ้นรูปต้องมีด้านใดด้านหนึ่งเป็นระนาบเรียบ

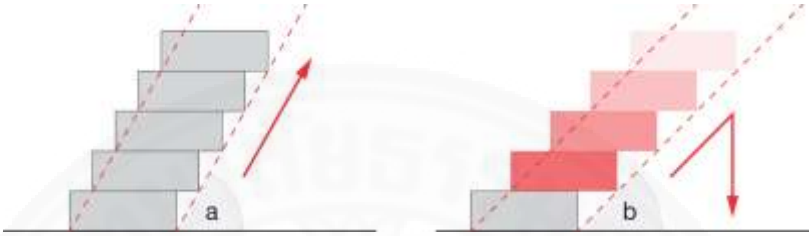
เนื่องจากการพิมพ์สามมิติระบบ FDM จำเป็นต้องพิมพ์บนแท่นพิมพ์ที่เป็นระนาบเรียบ ดังนั้นการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องมีการทอนรูปทรงต้นแบบให้มีด้านใดด้านหนึ่งเป็นระนาบเรียบ เพื่อให้เป็นส่วนฐานของชิ้นงานที่อยู่ติดกับแท่นพิมพ์เมื่อมีการขึ้นรูป จึงจะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้



ภาพที่ 2.37 การทอนรูปทรงให้มีระนาบเรียบโดยการตัดแบ่ง. โดย ผู้วิจัย, 2559

3. รูปทรงที่มีลักษณะยื่นออกจากฐานต้องมีองศาการเฉียงที่จำกัด

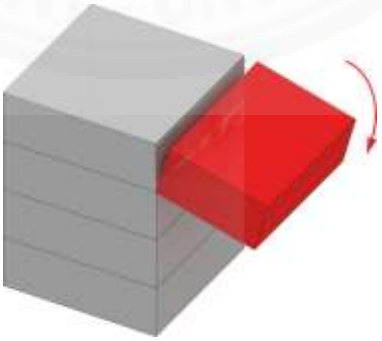
วัสดุที่มีน้ำหนักมากและใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานในการแข็งตัว เช่น ซีเมนต์ จำเป็นต้องมีฐานรองรับการขึ้นรูปในแต่ละชั้นเสมอ ทำให้การขึ้นรูปในลักษณะที่มีการยื่นออกจากฐานจะต้องมีองศาการเฉียงของรูปทรงภายในองศาที่จำกัด เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการพังทลายระหว่างขึ้นรูป โดยองศาการเฉียงที่ยอมให้จะขึ้นรูปกับคุณสมบัติและน้ำหนักของวัสดุ



ภาพที่ 2.38 รูปทรงที่ยื่นออกจากฐานในองศา a (ซ้าย) ที่จะไม่พังทลาย และองศา b (ขวา) ที่จะพังทลาย. โดย ผู้วิจัย, 2559

4. ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานในลักษณะคานยื่นได้ถ้าไม่มีส่วนรองรับ

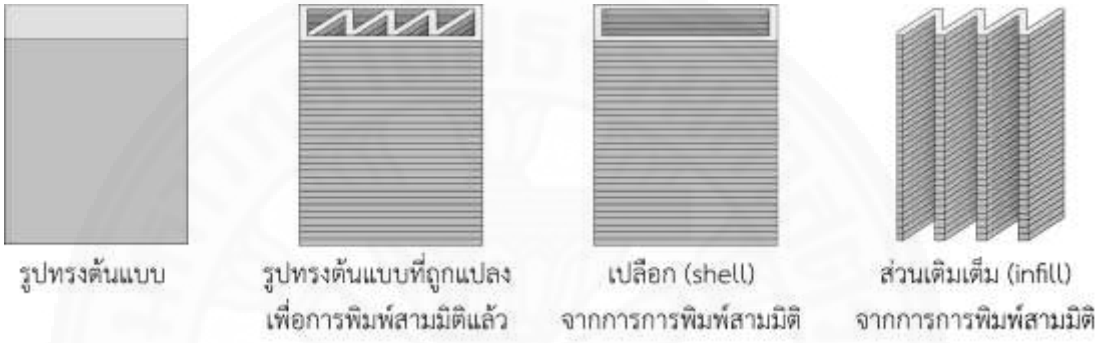
วัสดุที่มีน้ำหนักมากและใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานในการแข็งตัว เช่น ซีเมนต์ จำเป็นต้องมีฐานรองรับการขึ้นรูปในแต่ละชั้นเสมอ ทำให้การขึ้นรูปในลักษณะคานยื่นนั้นจึงเป็นไปไม่ได้ถ้าไม่มีส่วนรองรับในระหว่างการขึ้นรูป หากต้องการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นคานยื่นจะต้องใช้วัสดุอื่นที่สามารถแยกออกจากชิ้นงานได้เมื่อขึ้นรูปเสร็จเป็นส่วนรองรับคานยื่นในชิ้นงาน เช่น ใช้ทรายรองรับวัสดุซีเมนต์ส่วนที่เป็นคานยื่นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป หรือต้องทอนชิ้นงานส่วนที่เป็นคานยื่นแยกออกเป็นอีกชิ้นหนึ่ง แล้วออกแบบรอยต่อให้ชิ้นส่วนสามารถนำมาประกอบกันภายหลังได้ จึงจะได้รูปทรงที่ต้องการ



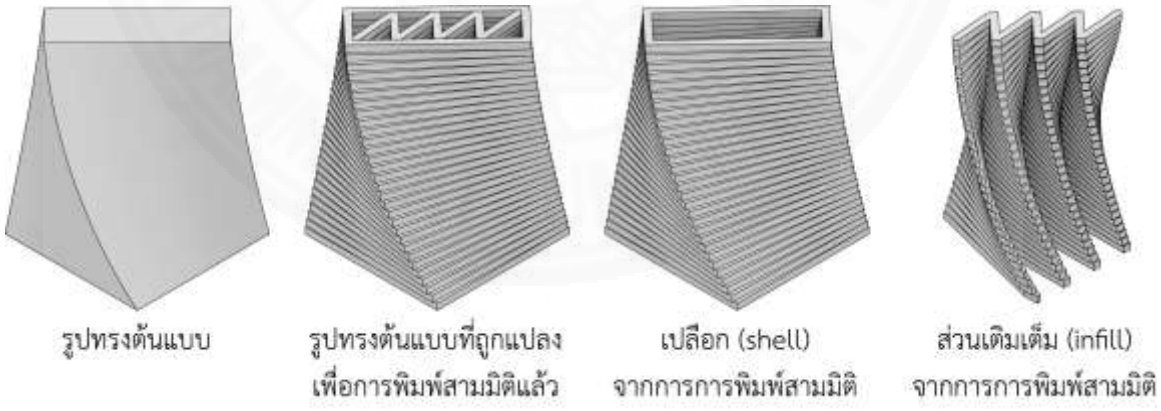
ภาพที่ 2.39 รูปทรงลักษณะคานยื่นจะพังทลายหากไม่มีส่วนรองรับในระหว่างการขึ้นรูป. โดย ผู้วิจัย, 2559

5. การทำแบบสำหรับการพิมพ์สามมิติต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้อยู่เสมอ

การจัดทำแบบสำหรับการพิมพ์สามมิติต้องอาศัยความเข้าใจหลักการทำงานและข้อจำกัดของเครื่องจักรและวัสดุที่ใช้พิมพ์เป็นอย่างดีเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ รูปทรงของเปลือก (shell) และส่วนเติมเต็ม (infill) ของชิ้นงานที่ถูกแปลงมาจากรูปทรงต้นแบบต้องมีลักษณะที่สัมพันธ์กัน เปลือก (shell) และส่วนเติมเต็ม (infill) ในแต่ละชั้นต้องเป็นรูปแบบเดียวกัน หรือมีลักษณะตามเปลือก (shell) ของแต่ละชั้น เช่น การบิดรูปทรงทั้งเปลือกและส่วนเติมเต็ม การย่อหรือขยายส่วน การยืดหรือหดรูปทรง เป็นต้น

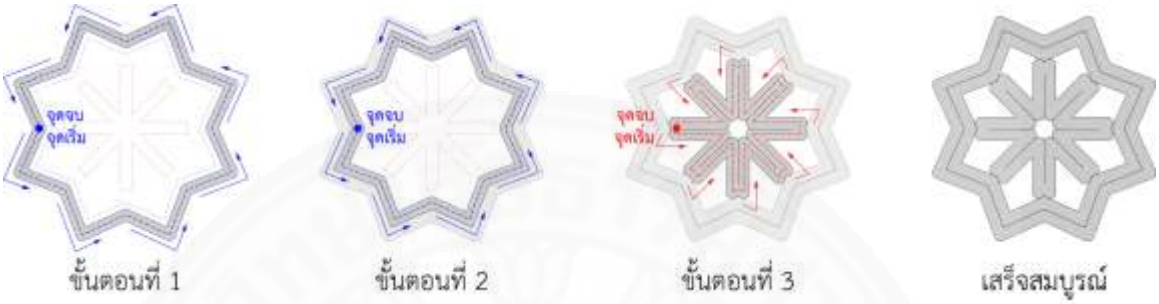


ภาพที่ 2.40 ลักษณะที่สัมพันธ์กันของเปลือกและส่วนเติมเต็มของรูปทรงในการพิมพ์สามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2559



ภาพที่ 2.41 ลักษณะที่สัมพันธ์กันของเปลือกและส่วนเติมเต็มของรูปทรงปิดในการพิมพ์สามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2559

นอกจากนี้การกำหนดเส้นทางการเดินของหัวฉีดวัสดุจะต้องทำให้เครื่องพิมพ์สามมิติสามารถฉีดวัสดุได้ตามขั้นตอนและเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง เช่น การกำหนดเส้นทางการเดินให้มีการฉีดเปลือก (shell) 2 ชั้นก่อน จากนั้นจึงฉีดส่วนเติมเต็ม (infill) โดยมีการเคลื่อนที่หัวฉีดแบบเริ่มเคลื่อนที่วนมาจบที่จุดเดิม จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรอยตะเข็บซึ่งเกิดจากจุดเริ่มและจุดจบของหัวฉีดในตำแหน่งเดียวกันทุกชั้น ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความเรียบร้อยมากขึ้น

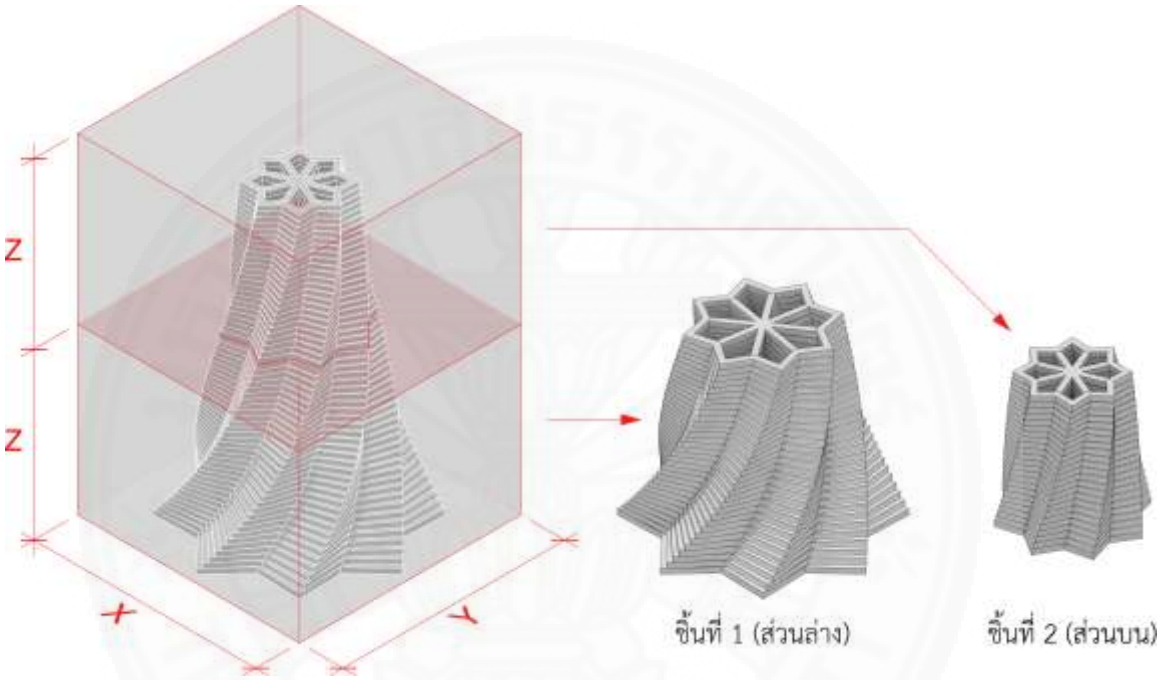


ภาพที่ 2.42 ขั้นตอนการพิมพ์ชิ้นงานโดยเริ่มจากเปลือก (shell) แล้วจึงพิมพ์ส่วนเติมเต็ม (infill). โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 2.43 ความแตกต่างของหน้าตัดและลักษณะการเดินของหัวฉีดวัสดุในแต่ละชั้น. โดย ผู้วิจัย, 2559

6. ขนาดของชิ้นงานขึ้นรูปถูกจำกัดภายใต้ขนาดของเครื่องพิมพ์สามมิติ

ชิ้นงานใด ๆ ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติจะต้องมีขนาดเล็กกว่าขอบเขตที่เครื่องพิมพ์สามมิตินั้นสามารถพิมพ์ได้ ทั้งในแกน X แกน Y และแกน Z ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่เกินกว่าขอบเขตที่เครื่องพิมพ์สามมิติจะสามารถพิมพ์ได้ จะต้องมีการแยกส่วนชิ้นงานให้มีขนาดเล็กลงให้อยู่ภายในขอบเขตของการพิมพ์สามมิติแล้วแยกพิมพ์ทีละส่วน เครื่องพิมพ์สามมิติจึงจะสามารถพิมพ์ชิ้นส่วนได้



ภาพที่ 2.44 การแยกส่วนชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่เครื่องพิมพ์สามมิติจะสามารถขึ้นรูปได้. โดยผู้วิจัย, 2559

การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติเพื่อการขึ้นรูปชิ้นงานล้วนมีหลักการและข้อจำกัดเหล่านี้เป็นพื้นฐาน อย่างไรก็ตามผู้ใช้สามารถประยุกต์วิธีการใช้ได้หลากหลายตามความเหมาะสมของรูปแบบงาน ตราบที่เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติยังคงมีหลักการทำงานเช่นเดิมและการพัฒนาเทคโนโลยียังไม่สามารถก้าวข้ามข้อจำกัดเหล่านี้ได้ การใช้งานเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติจะต้องอยู่ภายใต้หลักการและข้อจำกัดเหล่านี้ทั้งสิ้น

2.4 กรณีศึกษาศาลาขนาดเล็กที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ

การศึกษากรณีศึกษาสถาปัตยกรรมประเภทศาลาขนาดเล็กที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ เลือกศึกษาศาลาที่มีรูปแบบการใช้งานอเนกประสงค์ มีการออกแบบให้เป็นรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง**และ**มีโครงสร้างอยู่ได้ด้วยตัวเอง ก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการขึ้นรูปชิ้นส่วนแล้วประกอบขึ้นเป็นตัวศาลา โดยกรณีศึกษาที่เลือกมาศึกษามีดังนี้

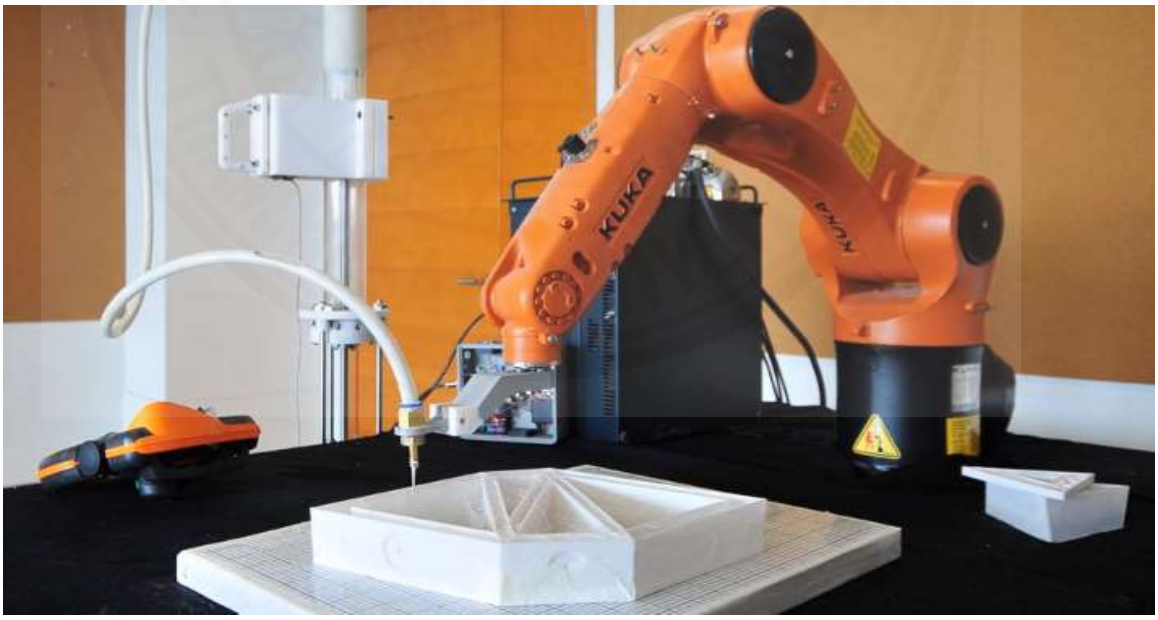
2.4.1 Silky Concrete Project: Massive Concrete Installation

Silk Project spatial lab ได้ถูกก่อตั้งขึ้นในปี ค.ศ. 2012 ในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน นำโดยผู้ที่มีประสบการณ์ในการทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ วัสดุศาสตร์ และการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ มีจุดประสงค์เพื่อส่งเสริมและพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านการใช้เทคโนโลยีในและวัสดุใหม่ ๆ ให้กับวงการการศึกษาด้านการออกแบบ โครงการ Silky Concrete เป็นงานศิลปะติดตั้ง (installation art) สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการขึ้นรูปชิ้นส่วนแต่ละชิ้น แล้วนำมาประกอบกันเป็นศาลาขนาดเล็กสำหรับตั้งกลางแจ้ง มีลักษณะเป็นศาลารูปทรงเปลือกโค้งที่มีโครงสร้างอยู่ได้ด้วยตัวเอง ซึ่งงานชิ้นนี้เป็นผลของการศึกษาค้นคว้าและทดลองในงานออกแบบงานศิลปะจัดวางของกลุ่ม Shanghai Digital Future จาก Tongji University

ภาพที่ 2.45 Silky Concrete Project. จาก http://3dprint.com/80490/silky-concrete-project, 2015

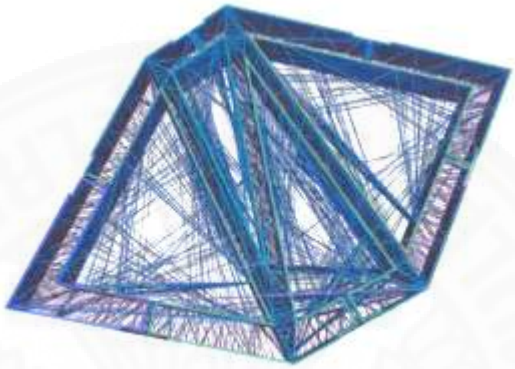
ตัวศาลา Silky Concrete Project มีขนาด 5.40 x 4.30 x 2.50 เมตร ถูกออกแบบให้มีทางเข้า 3 ทาง โดยแต่ละทางจะมีความสูง 1.80 เมตร ตัวศาลาถูกประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนที่แตกต่างกันทั้งหมด 165 ชิ้น ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปโดยการพิมพ์สามมิติทั้งหมด การขึ้นรูปโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติร่วมกับแขนหุ่นยนต์ 1 KUKA Agilus ซึ่งเป็นแขนหุ่นยนต์สำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความถูกต้องแม่นยำ มีคุณภาพที่ยอมรับได้ในงานก่อสร้าง และทำให้การประกอบชิ้นงานเป็นไปได้อย่างราบรื่น

ภาพที่ 2.46 แบบจำลองสามมิติของ Silky Concrete Project. จาก http://3dprint.com/80490/silky-concrete-project, 2015

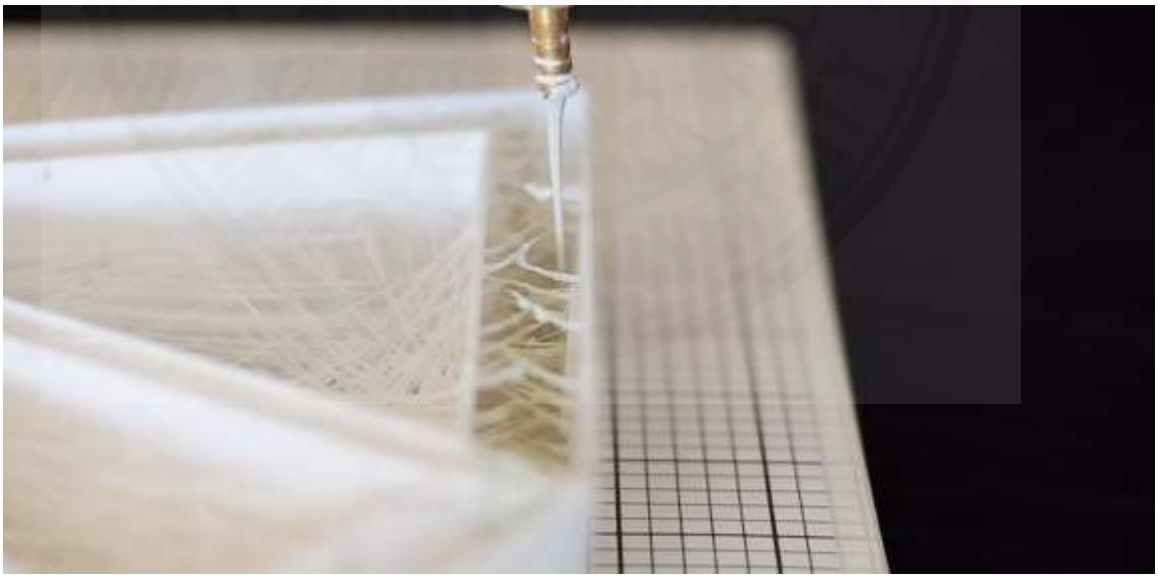


ภาพที่ 2.47 การพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์สำหรับงานอุตสาหกรรม. จาก http://3dprint.com/80490/silky-concrete-project, 2015

รูปทรงเปลือกโค้งของศาลาถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วน 165 ชิ้น ในแต่ละชิ้นจะมีแบ่งส่วนออกเป็นโครงสามเหลี่ยมย่อย ๆ และสร้างโครงข่ายของเส้นพลาสติกขึ้น เมื่อเทปูนซีเมนต์ลงในช่องว่างของชิ้นส่วน จะได้เป็นชิ้นงานวัสดุพลาสติกและซีเมนต์ที่ได้รับการเสริมแรงภายใน ทำให้ชิ้นส่วนมีความแข็งแรงและมีประสิทธิภาพให้การรับแรงได้ดียิ่งขึ้น วัสดุที่ถูกใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทั้งหมดมีน้ำหนักโดยประมาณ 500 กิโลกรัม ประกอบด้วย พลาสติก 200 กิโลกรัม ซีเมนต์ 200 กิโลกรัม สารผสมเพิ่ม 50 กิโลกรัม และน้ำ 50 แกลลอน

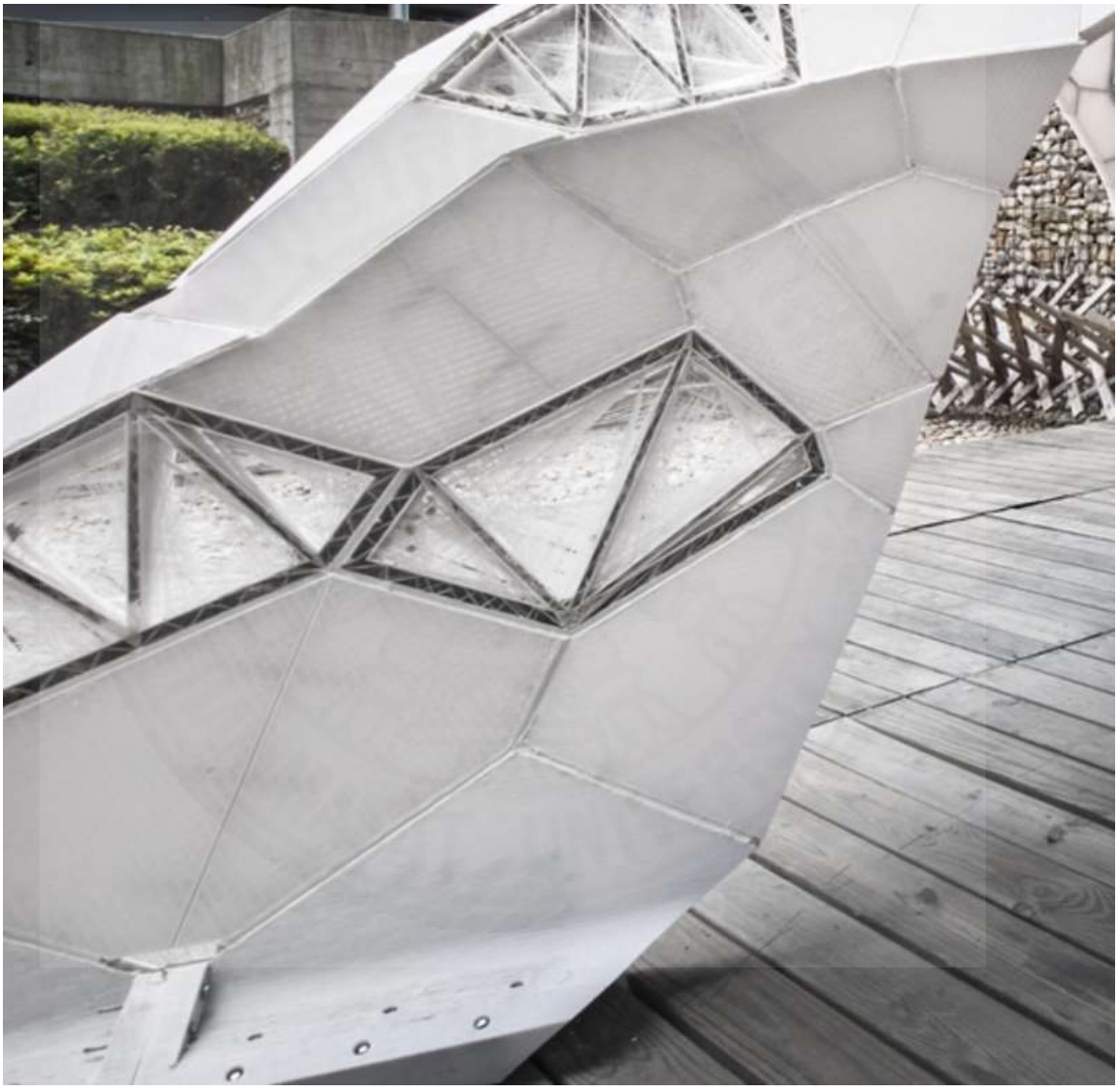


ภาพที่ 2.48 การออกแบบชิ้นส่วนของ Silky Concrete Project. จาก http://3dprint.com/80490/silky-concrete-project, 2015

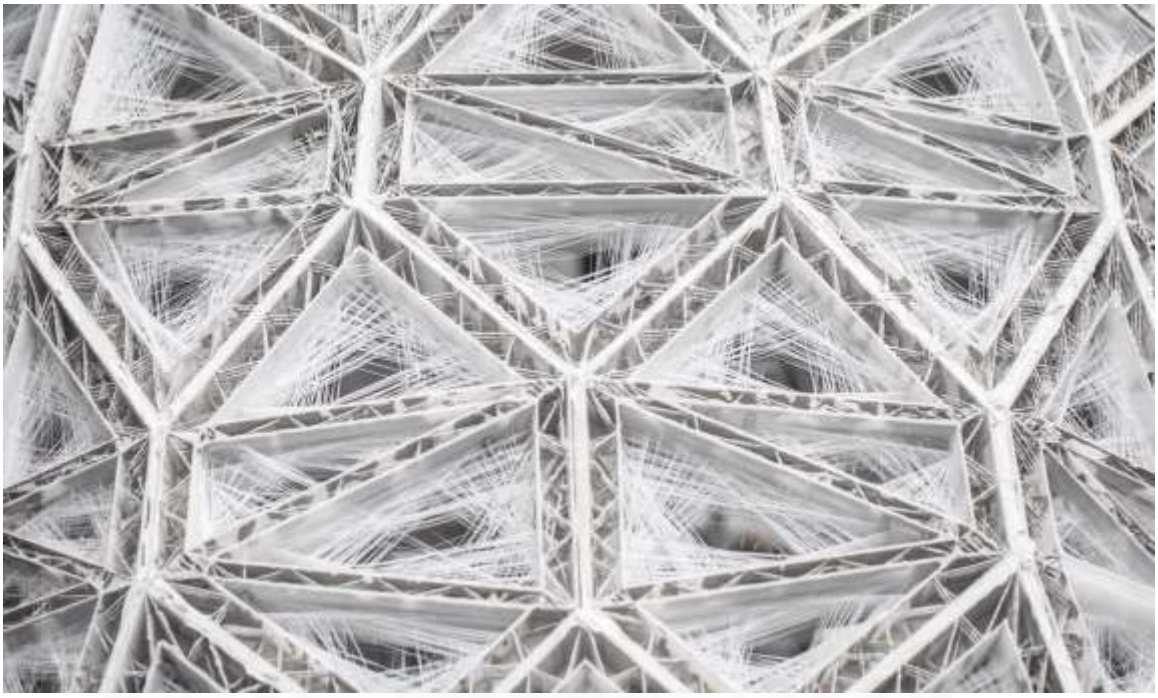


ภาพที่ 2.49 การเทซีเมนต์ลงในชิ้นงานขึ้นรูปของ Silky Concrete Project. จาก http://3dprint.com/80490/silky-concrete-project, 2015

ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นได้ถูกออกแบบให้มีรูสำหรับเสียบสลักเพื่อเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนอีกชิ้นหนึ่ง การประกอบชิ้นงานเป็นการเชื่อมต่อชิ้นส่วนแต่ละชิ้นด้วยสลัก เมื่อชิ้นส่วนทั้ง 165 ชิ้นถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกัน จึงเกิดเป็นโครงสร้างที่ทำให้ศาลารูปทรงเปลือกโค้งสามารถยืนหยัดอยู่ได้ด้วยตัวของมันเอง ซึ่งงานชิ้นนี้มีระยะเวลาในการทำงานทั้งหมด 29 วัน แบ่งเป็นระยะเตรียมงาน 20 วัน และช่วงประกอบชิ้นงาน 9 วัน ดำเนินการโดยทีมนักศึกษาทำงานร่วมกับอาจารย์



ภาพที่ 2.50 การประกอบชิ้นงานโดยมีการใส่สลักไว้ระหว่างชิ้นส่วนแต่ละชิ้น. จาก http://3dprint.com/80490/silky-concrete-project, 2015

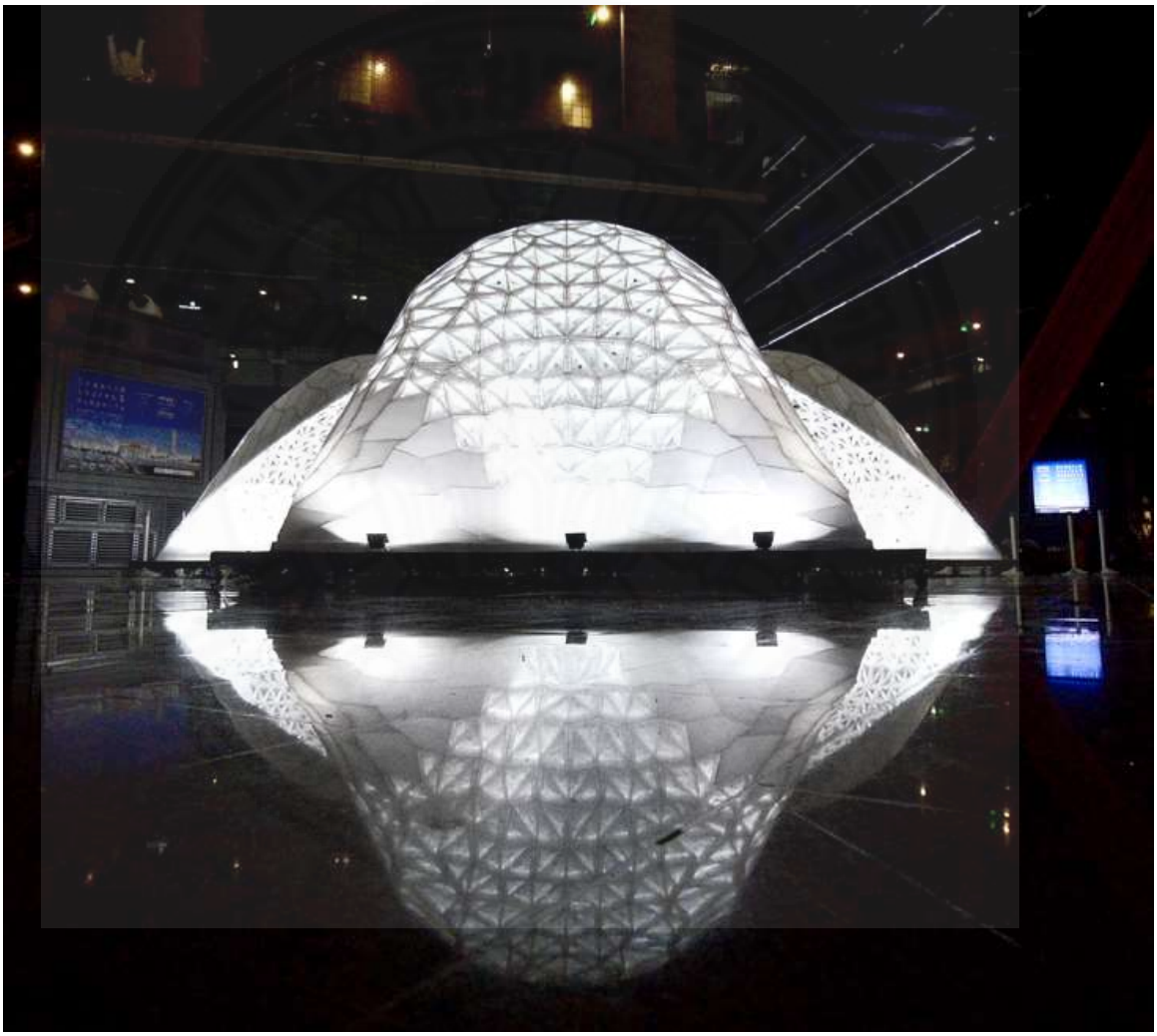


ภาพที่ 2.51 ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นประกอบรวมกันเป็นโครงสร้างแบบสามเหลี่ยม. จาก http://3dprint.com/80490/silky-concrete-project, 2015

ภาพที่ 2.52 การประกอบชิ้นงานโดยทีมนักศึกษา. จาก http://3dprint.com/80490/silky-concrete-project, 2015

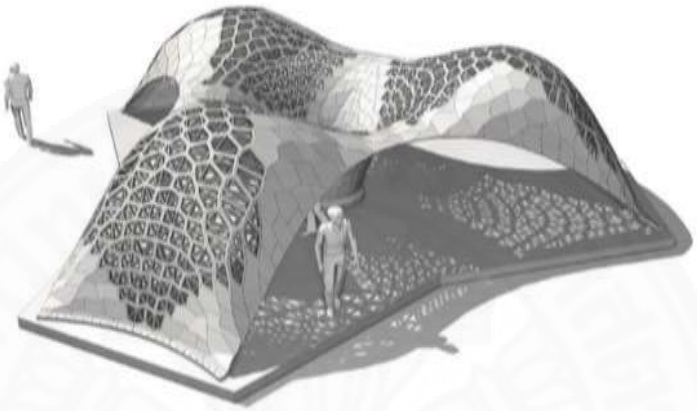
2.4.2 Vulcan: World's Largest 3D Printed Pavilion

Vulcan Pavilion เป็นศาลาชั่วคราวที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก ได้รับการบันทึกไว้โดย Guinness World Records ในปี ค.ศ.2015 ศาลาหลังนี้ออกแบบโดย Laboratory for Creative Design (LCD) กลุ่มสถาปนิกจากกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน ซึ่งถูกนำมาจัดแสดงในงาน Beijing Design Week 2015 ที่ Parkview Green ห้างสรรพสินค้าที่ใหญ่ที่สุดแห่งหนึ่งในกรุงปักกิ่ง



ภาพที่ 2.53 Vulcan Pavilion. จาก
http://www.urdesignmag.com/architecture/2015/10/08/vulcan-worlds-largest-3d-printed-pavilion-by-laboratory-for-creative-design, 2015

ตัวศาลา Vulcan มีขนาด 8.08 x 8.08 x 2.88 เมตร ถูกออกแบบให้เป็นศาลารูปทรงเปลือกโค้ง มีลักษณะคล้ายดอกไม้ที่มี 3 กลีบ ส่วนที่มีลักษณะคล้ายกลีบดอกไม้ทั้ง 3 ด้าน เป็นรูปทรงเปลือกโค้งที่กระจายตัวออกจากจุดศูนย์กลางของศาลา เกิดเป็นพื้นผิวโค้งที่มีลักษณะคล้าย arch ในแต่ละด้าน ซึ่งเป็นการแบ่งเบาภาระการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนไปตามจุดต่าง ๆ ทั้งจุดศูนย์กลางและส่วนเปลือกโค้งด้านนอกทั้ง 3 ด้าน การลดระยะพาดของรูปทรงเปลือกโค้งในลักษณะนี้ทำให้ความต่อเนื่องพื้นที่ภายในตัวศาลาลดลง แต่ทำให้ได้พื้นที่ภายในโดยรวมเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.54 แบบจำลองสามมิติของ Vulcan Pavilion. จาก http://www.domusweb.it/en/news/2015/10/10/laboratory_for_creative_design_vulcan.html, 2015

ภาพที่ 2.55 มุมมองภายใน Vulcan Pavilion. จาก http://www.domusweb.it/en/news/2015/10/10/laboratory_for_creative_design_vulcan.html, 2015

ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะมีแบ่งส่วนออกเป็นโครงสามเหลี่ยมย่อย ๆ และสร้างโครงข่ายของเส้นพลาสติกขึ้นเพื่อให้ชิ้นส่วนมีความแข็งแรงและมีประสิทธิภาพให้การรับแรงได้ดียิ่งขึ้น ตัวศาลาถูกประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนทั้งหมด 1,023 ชิ้น ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปโดยการพิมพ์สามมิติทั้งหมด ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความถูกต้องแม่นยำ มีคุณภาพที่ยอมรับได้ในงานก่อสร้าง และทำให้การประกอบชิ้นงานเป็นไปได้อย่างราบรื่น

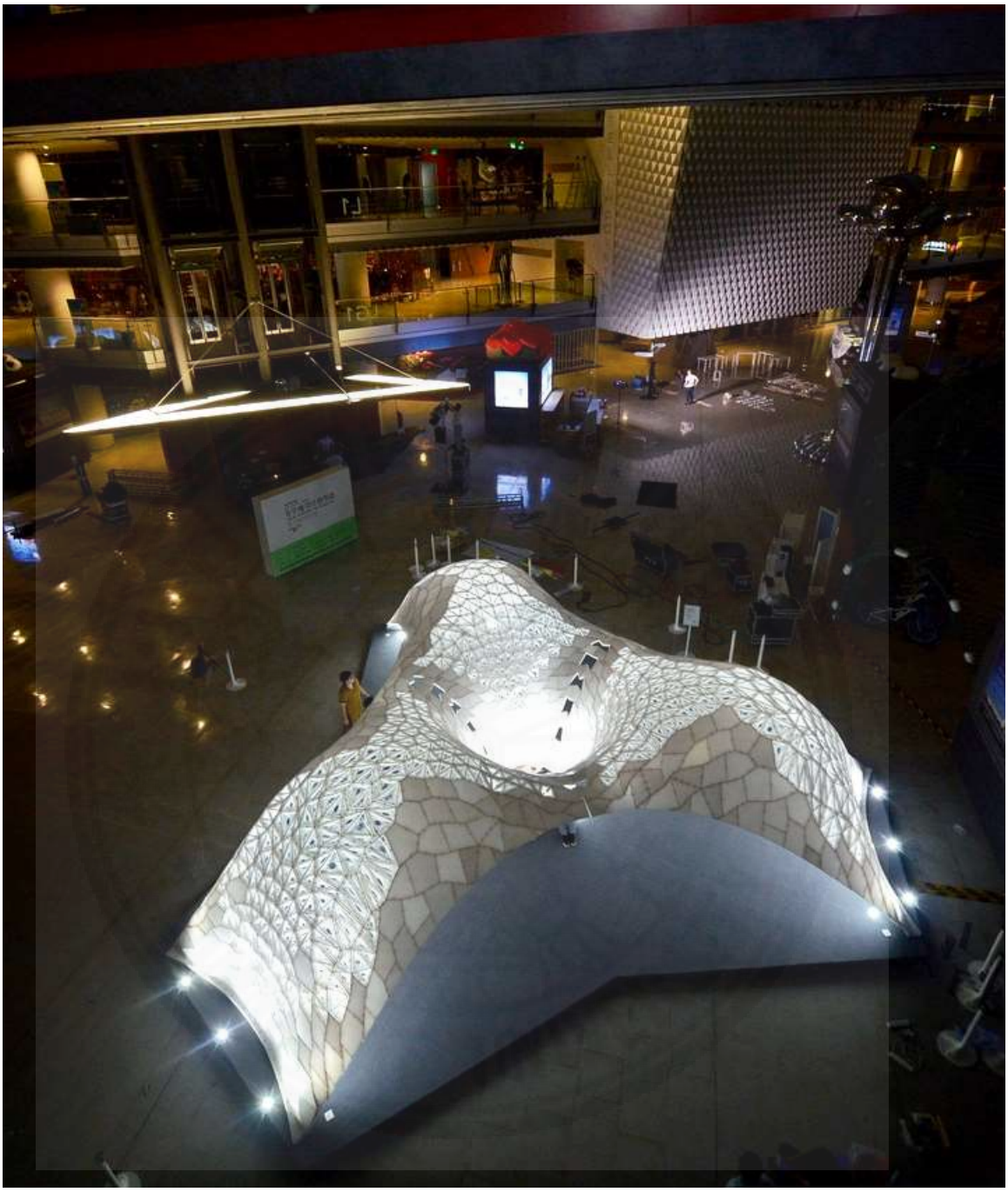
ภาพที่ 2.56 รายละเอียดชิ้นส่วนของ Vulcan Pavilion. จาก http://www.domusweb.it/en/news/2015/10/10/laboratory_for_creative_design_vulcan.html, 2015

ภาพที่ 2.57 การขึ้นรูปชิ้นส่วนของ Vulcan Pavilion ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ. จาก http://www.domusweb.it/en/news/2015/10/10/laboratory_for_creative_design_vulcan.html, 2015

ในการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ผู้ประกอบได้แยกส่วนการประกอบศาลาออกเป็น 3 ส่วน ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นถูกยึดเข้าด้วยกันโดยใช้สลัก หลังจากที่ประกอบทั้ง 3 ส่วนเรียบร้อยแล้วจึงเคลื่อนย้ายทั้ง 3 ส่วนมาประกอบรวมกันเป็นตัวศาลา การแยกส่วนการประกอบนี้ทำให้กระบวนการก่อสร้างง่ายขึ้น และลดระยะเวลาการทำงานได้เนื่องจากการประกอบส่วนของศาลาทั้ง 3 ส่วนสามารถดำเนินการไปพร้อมกันได้

ภาพที่ 2.58 การประกอบส่วนของศาลาทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกัน. จาก http://www.domusweb.it/en/news/2015/10/10/laboratory_for_creative_design_vulcan.html, 2015

ภาพที่ 2.59 Vulcan Pavilion. จาก http://www.domusweb.it/en/news/2015/10/10/laboratory_for_creative_design_vulcan.html, 2015



ภาพที่ 2.60 Vulcan Pavilion. จาก http://www.archdaily.com/776169/lcds-vulcan-awarded-guinness-world-record-for-largest-3d-printed-structure, 2015

จากการศึกษากรณีศึกษาศาลารูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งที่มีโครงสร้างอยู่ได้ด้วยตัวเอง ซึ่งสร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ประกอบด้วย Silky Concrete Project ซึ่งเป็นผลงานเชิงทดลองในระดับสถาบันการศึกษา และ Vulcan Pavilion ที่เป็นผลงานการออกแบบในระดับมืออาชีพ สามารถเปรียบเทียบกรณีศึกษาทั้ง 2 กรณีได้ดังนี้

ตารางที่ 2.3

เปรียบเทียบกรณีศึกษาศาลารูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง

กรณีศึกษา / รายละเอียด	Silky Concrete Project	Vulcan Pavilion
วัตถุประสงค์	สร้างขึ้นเพื่อศึกษากระบวนการออกแบบและการทดลองใช้วัสดุแบบผสมผสาน	สร้างขึ้นเพื่อจัดแสดงและเป็นจุดดึงดูดผู้เข้าชมงาน Beijing Design Week 2015
ขนาด	5.40 x 4.30 x 2.50 เมตร	8.08 x 8.08 x 2.88 เมตร
จำนวนชิ้นส่วน	165 ชิ้น	1,023 ชิ้น
การออกแบบชิ้นส่วน	โครงสร้างสามเหลี่ยมและโครงข่ายภายใน	โครงสร้างสามเหลี่ยมและโครงข่ายภายใน
เทคโนโลยีการขึ้นรูป	การพิมพ์สามมิติแบบ FDM	การพิมพ์สามมิติแบบ FDM
วัสดุที่ใช้	พลาสติกและซีเมนต์	พลาสติก
การประกอบชิ้นส่วน	ยึดชิ้นส่วนเข้าหากันด้วยสลัก	ยึดชิ้นส่วนเข้าหากันด้วยสลัก
ลักษณะการใช้งาน	พื้นที่อเนกประสงค์	พื้นที่อเนกประสงค์

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

กรณีศึกษาทั้ง 2 กรณีมีการออกแบบรูปทรงให้มีความสามารถในเชิงโครงสร้าง คือ การออกแบบในลักษณะรูปทรงเปลือกโค้ง และการคลี่คลายแบบก่อสร้างได้มีการแบ่งส่วนของตัวศาลาออกเป็นชิ้นย่อย ๆ เพื่อขึ้นรูปชิ้นส่วนด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ และยังได้คำนึงถึงการขนย้ายและการประกอบชิ้นส่วนด้วยฝีมือมนุษย์ โดยมีการออกแบบให้ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีรูสำหรับเสียบสลักเพื่อประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอีกชิ้นหนึ่ง นอกจากนี้ชิ้นส่วนยังได้ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างภายในชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเพื่อเพิ่มศักยภาพในการรับแรงของชิ้นส่วน ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการถ่ายเทแรงภายในรูปทรงของศาลาอีกด้วย

จากการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยวัสดุคอนกรีต ได้พบข้อบกพร่องของงานก่อสร้างและกระบวนการก่อสร้าง ได้แก่ การเกิดความคลาดเคลื่อนของงานก่อสร้างจากฝีมือมนุษย์ กระบวนการทำงานมีความยากลำบากจากการทำงานที่มีหลายขั้นตอนทั้งการเตรียมงานและการก่อสร้าง และไม้แบบที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ต่อจะกลายเป็นขยะจากการก่อสร้าง ซึ่งจากการศึกษาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์และวิเคราะห์ศักยภาพของเทคโนโลยี คาดว่าการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในงานก่อสร้างสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นไม่มากก็น้อย ทั้งนี้การนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในงานก่อสร้าง จำเป็นจะต้องเข้าใจหลักการทำงานและข้อจำกัดของเทคโนโลยีเป็นอย่างดี จึงจะสามารถใช้เทคโนโลยีได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับโจทย์การออกแบบในงานวิจัยนี้ การใช้ระบบการพิมพ์สามมิติแบบ Extrusion Deposition (FDM) มีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้งานมากกว่า เนื่องจากเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ และมีต้นทุนของเทคโนโลยีที่ถูกกว่า อีกทั้งชิ้นงานขึ้นรูปไม่จำเป็นต้องมีความละเอียดสูงเนื่องจากต้องมีการเก็บความเรียบร้อยของงานหลังกระบวนการประกอบชิ้นงานอยู่แล้ว ซึ่งสามารถสร้างงานที่มีคุณภาพได้เช่นกัน

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยนี้เป็นการทดลองนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มาใช้ในงานสถาปัตยกรรม เพื่อเสนอแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีดังกล่าว ซึ่งจากการศึกษากรณีศึกษาศาลาขนาดเล็กที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ พบว่าแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างของกรณีศึกษาสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ได้ ทั้งนี้ต้องมีการปรับใช้แนวทางดังกล่าวภายใต้ข้อจำกัดของเทคโนโลยีและโจทย์การออกแบบที่แตกต่างกัน

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มาใช้ในงานสถาปัตยกรรม เป็นการศึกษากระบวนการออกแบบและก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งในลักษณะวิจัยและพัฒนาเพื่อสร้างแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการศึกษาภายใต้เงื่อนไขดังนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เพื่อนำมาใช้ในงานสถาปัตยกรรม ศึกษาหลักการทำงานและข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์สามมิติ รวมถึงกรณีศึกษาสถาปัตยกรรมที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการก่อสร้าง
2. ออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งและคลี่คลายแบบเพื่อใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการก่อสร้าง
3. ศึกษาความมั่นคงแข็งแรงของศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง โดยการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของรูปแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. ศึกษาวิธีการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ซึ่งครอบคลุมถึงการออกแบบข้อต่อและวิธีการประกอบชิ้นงานเพื่อลดข้อบกพร่องของงานก่อสร้าง
5. ประเมินความเป็นไปได้ของการใช้งาน ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้าง และความเป็นไปได้ในการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง

3.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทคโนโลยีในลักษณะวิจัยและพัฒนา เพื่อสร้างแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ซึ่งมีข้อจำกัดในการศึกษาหลายประการ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4. ศึกษาภายใต้ข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเทคโนโลยี เนื่องจากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่และยังไม่แพร่หลายในวงการก่อสร้างของประเทศไทย ซึ่งมีข้อจำกัดในการเข้าถึงเทคโนโลยีที่ใช้

5. ศึกษาภายใต้ข้อจำกัดทางด้านงบประมาณในการทำงานวิจัย เนื่องจากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เป็นเทคโนโลยีที่ต้องใช้ต้นทุนสูงในการศึกษา การทดลองจึงมีขอบเขตที่จำกัด

6. ศึกษาภายใต้ข้อจำกัดทางด้านระยะเวลาในการทำงานวิจัยที่ต้องสิ้นสุดในระยะเวลาที่กำหนด

3.3 ตัวแปรที่ศึกษา

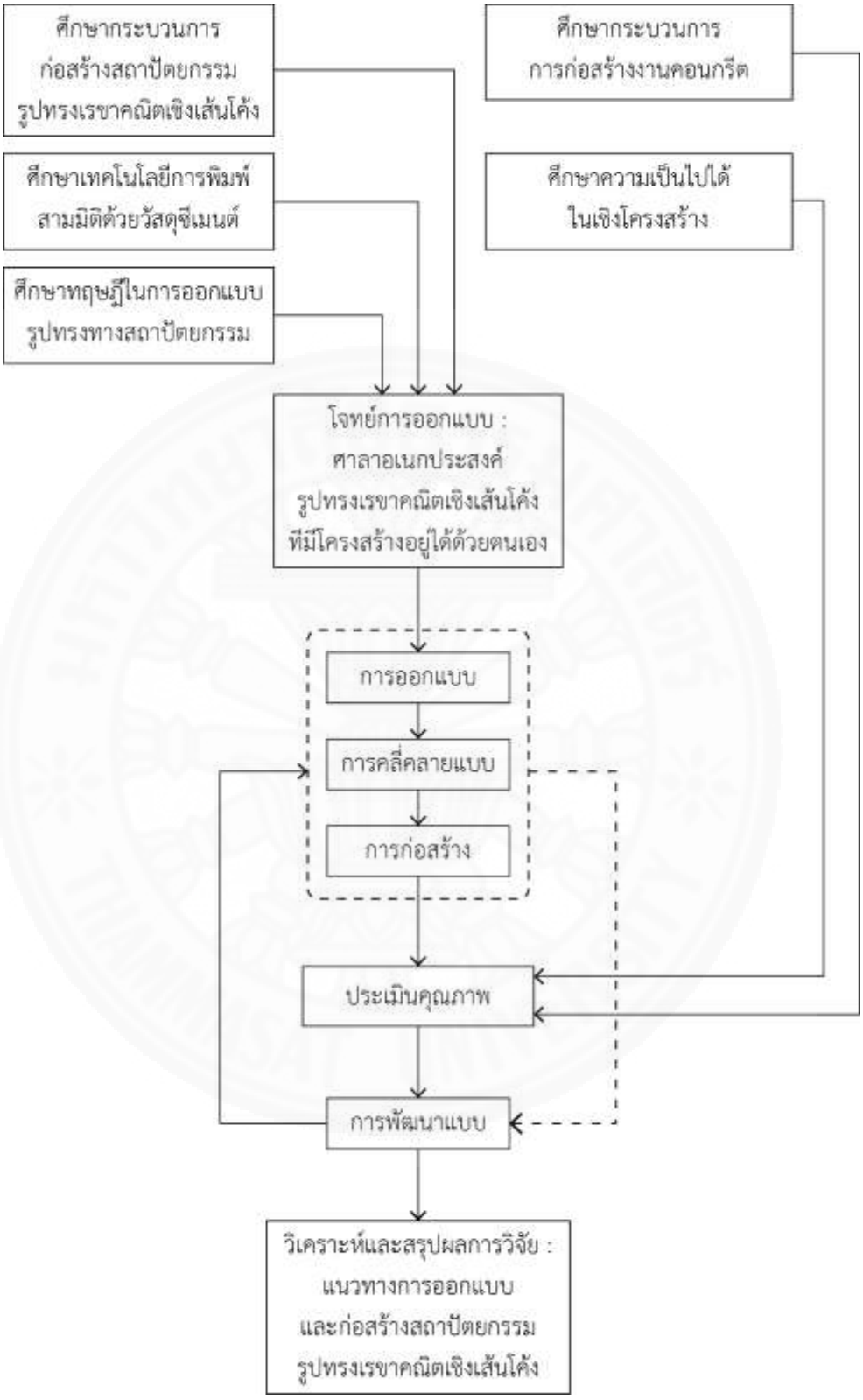
1. รูปแบบของศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง
2. ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้างของศาลาอเนกประสงค์
3. ความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง
4. เทคโนโลยีในการก่อสร้าง
5. ค่าก่อสร้างเปรียบเทียบกับระบบก่อสร้างทั่วไป

3.4 การประเมิน

ประเมินผลลัพธ์จากการออกแบบและก่อสร้างให้ได้ตามเกณฑ์หรือมาตรฐานที่กำหนด รวมถึงหาแนวทางในการปรับปรุงหรือแก้ไขกระบวนการออกแบบและกระบวนการก่อสร้าง เพื่อสรุปผลโดยกำหนดเป็นแนวทางในการออกแบบและก่อสร้าง

3.5 การกำหนดโจทย์ในการออกแบบ

จากการศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง นำผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลมาเป็นโจทย์ในการศึกษาและหาแนวทางแก้ไขปัญหา โดยกำหนดให้โจทย์เป็นการออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งและใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการก่อสร้าง



ภาพที่ 3.1 แผนดำเนินการวิจัยการออกแบบและก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์, โดย ผู้วิจัย, 2559

ตารางที่ 3.1

ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เครื่องมือที่ใช้

กระบวนการ	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	เครื่องมือ	ผลการศึกษา
1. ออกแบบรูปทรง	ทฤษฎีออกแบบรูปทรงทางสถาปัตยกรรม	โปรแกรมสร้างหุ่นจำลองสามมิติ Rhinoceros 5.0	วิธีการออกแบบรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง
2. ออกแบบโครงสร้าง	ทฤษฎีออกแบบรูปทรงทางสถาปัตยกรรม	โปรแกรมสร้างหุ่นจำลองสามมิติ Rhinoceros 5.0	วิธีการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมกับรูปทรง
3. วิเคราะห์โครงสร้าง		โปรแกรมศึกษาโครงสร้าง Autodesk Inventor	ความเป็นไปได้ในเชิงโครงสร้างของแบบ
4. คลี่คลายแบบก่อสร้าง	ทฤษฎีออกแบบรูปทรงทางสถาปัตยกรรม	โปรแกรมสร้างหุ่นจำลองสามมิติ Rhinoceros 5.0	วิธีการคลี่คลายแบบก่อสร้างสำหรับใช้ในเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ
5. วิธีการก่อสร้าง	กรณีศึกษา		วิธีการประกอบชิ้นงาน
6. ประเมินผล		เกณฑ์การประเมิน	ข้อจำกัดในการออกแบบและความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง
7. สรุปผล			แนวทางการออกแบบและก่อสร้าง

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

บทที่ 4
การวิเคราะห์พื้นที่ตั้งและกำหนดรายละเอียดศาลาอเนกประสงค์

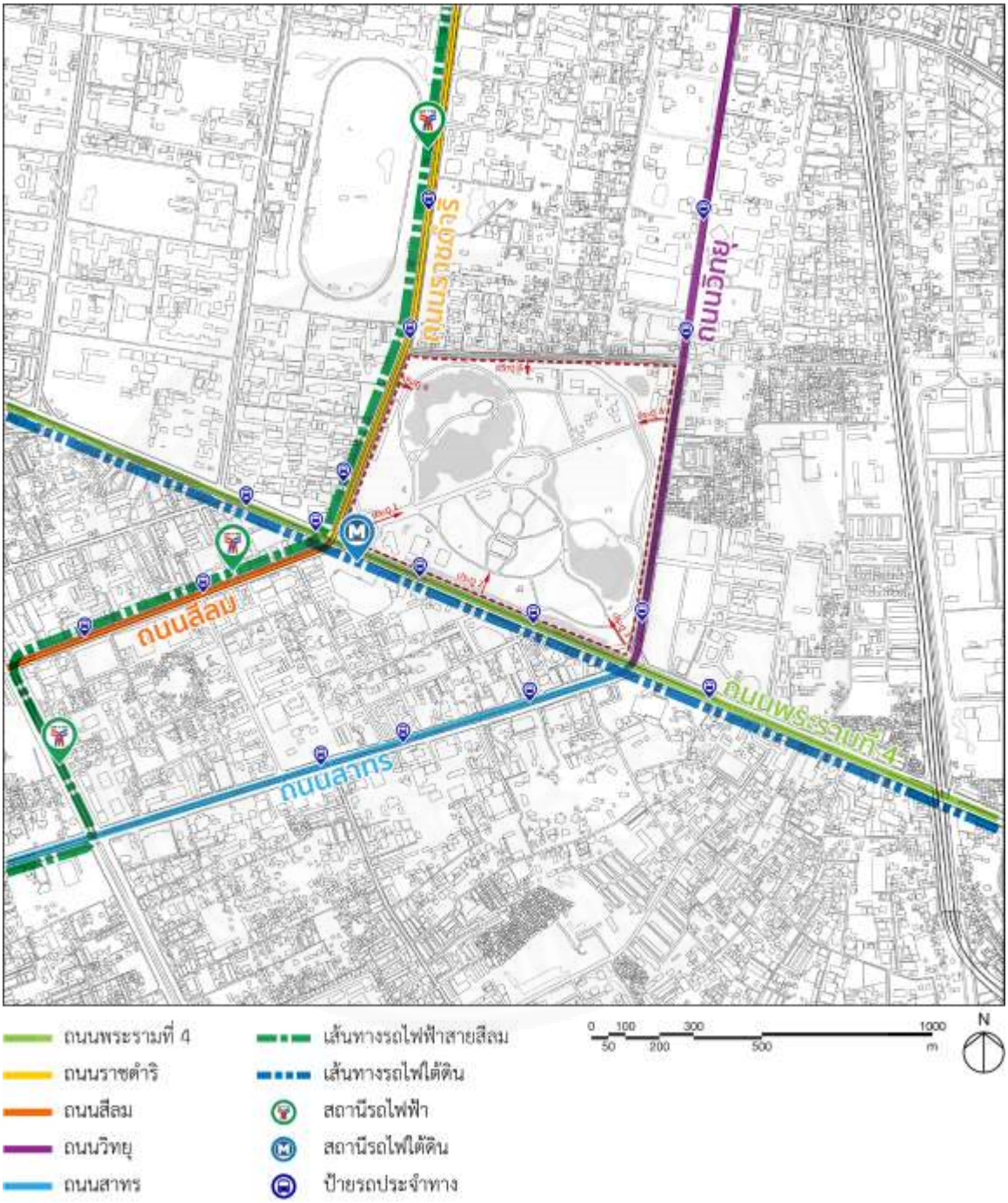
จากการศึกษากระบวนการออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง ผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่สวนลุมพินี ซึ่งเป็นสวนสาธารณะใจกลางเมือง และนำมาศึกษาบริบทในด้านต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นโจทย์ในการออกแบบศาลาอเนกประสงค์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ทำเลที่ตั้ง: สวนลุมพินี

สวนลุมพินีเป็นสวนสาธารณะขนาดใหญ่ใจกลางเมืองที่ตั้งอยู่ติดกับย่านศูนย์กลางทางธุรกิจของกรุงเทพมหานครอย่างสาทร – สีลม เป็นสวนสาธารณะที่มีผู้คนจำนวนมากมาทำกิจกรรมหลากหลายประเภทเป็นประจำทุกวัน สวนลุมพินีเป็นทั้งพื้นที่สำหรับพักผ่อน ออกกำลังกาย และจัดงานเทศกาลในโอกาสต่าง ๆ ของผู้คนในกรุงเทพมหานคร

ภาพที่ 4.1 ทัศนียภาพภายในสวนลุมพินี. โดย ผู้วิจัย, 2559

4.1.1 การเข้าถึงที่ตั้ง



ภาพที่ 4.2 แผนผังแสดงช่องทางการเข้าถึงที่ตั้งสวนลุมพินี. โดย ผู้วิจัย, 2559

1. การเข้าถึงด้วยรถยนต์ส่วนบุคคล

สวนลุมพินีมีถนนทั้งหมด 5 สายตัดผ่าน ได้แก่ ถนนพระรามที่ 4 ถนนราชดำริ ถนนวิทยุ ถนนสีลม และถนนสาทร ในกรณีปกติสวนลุมพินีจะอนุญาตให้นำรถยนต์เข้าไปจอดในที่จอดรถภายในสวนลุมพินีผ่านทางประตู 4 ซึ่งอยู่ติดกับถนนวิทยุเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีที่จอดรถภายนอกสวนลุมพินีบริเวณประตู 6 ติดกับถนนราชดำริซึ่งผู้ที่ขับรถยนต์ส่วนตัวมาสามารถนำรถไปจอดได้เช่นกัน

2. การเข้าถึงด้วยรถประจำทาง

ถนนรอบสวนลุมพินีมีป้ายรถประจำทางอยู่ 4 จุดด้วยกัน ประกอบด้วยป้ายบริเวณถนนพระรามที่ 4 ทั้งหมด 2 จุด ถนนราชดำริ 1 จุด และ ถนนวิทยุ 1 จุด สายรถประจำทางที่ให้บริการ ได้แก่ สาย 4, 13, 15, 45, 47, 50, 62, 67, 76, 77, 204, 505 และ 514

3. การเข้าถึงด้วยรถไฟฟ้าและรถไฟใต้ดิน

สวนลุมพินีสามารถเข้าถึงได้ด้วยขนส่งมวลชนระบบราง ทั้งรถไฟฟ้าและรถไฟใต้ดิน โดยสถานีรถไฟฟ้าที่อยู่ใกล้ที่สุด คือ สถานีศาลาแดง และสถานีรถไฟใต้ดินที่อยู่ใกล้ที่สุด คือ สถานีลุมพินี

4.1.2 กิจกรรมในพื้นที่

เนื่องจากสวนลุมพินีตั้งอยู่ใจกลางเมืองและสามารถเข้าถึงได้จากหลากหลายช่องทางการเดินทาง ทำให้สวนลุมพินีเป็นสวนสาธารณะที่มีผู้คนทุกกลุ่ม ทุกเพศและทุกวัยมาทำกิจกรรมหลากหลายประเภท ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบของกิจกรรมได้ดังนี้

1. กิจกรรมนันทนาการ

ในสวนลุมพินีมีพื้นที่สำหรับพักผ่อนเพื่อสูดอากาศบริสุทธิ์ท่ามกลางเมืองใหญ่ ภายในสวนมีต้นไม้หนาแน่นให้ความร่มรื่นกับพื้นที่ มีผู้คนหลากหลายกลุ่มมานั่งพักผ่อน พบปะพูดคุยกัน โดยกลุ่มที่พบได้มากที่สุดจะเป็นกลุ่มผู้สูงอายุ ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีการพบปะพูดคุยกันมากกว่ากลุ่มอื่น นอกจากนี้ภายในสวนลุมพินียังมีพื้นที่ส่วนที่เป็นร้านอาหาร คอยให้บริการผู้ที่มาทำกิจกรรมในสวนอีกด้วย

ภาพที่ 4.3 กิจกรรมนันทนาการภายในสวนลุมพินี. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 4.4 กิจกรรมนันทนาการภายในสวนลุมพินี. โดย ผู้วิจัย, 2559

2. การออกกำลังกาย

กิจกรรมหลักที่ผู้คนนิยมมาทำที่สวนลุมพินีอย่างเป็นกิจวัตรคือการออกกำลังกาย เป็นการเสริมสร้างสุขภาพทั้งทางร่ายกายและจิตใจให้แข็งแรง ทั้งนี้การออกกำลังกายในสวนลุมพินีนั้นมีหลากหลายรูปแบบมาก ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะการมีปฏิสัมพันธ์ในระหว่างการออกกำลังกายได้ 2 รูปแบบ คือ มีการออกกำลังกายแบบตัวคนเดียว เช่น การเดิน การวิ่ง การยกน้ำหนัก และการออกกำลังกายแบบเป็นหมู่คณะ เช่น การเต้นแอโรบิก การรำไทเก๊ก โยคะ กายบริหาร เป็นต้น ผู้ที่มาออกกำลังกายมีอยู่ทุกเพศทุกวัย ตั้งแต่วัยรุ่น วัยทำงาน ไปจนถึงผู้สูงอายุ และยังมีชาวต่างชาติอีกด้วย ช่วงเวลาที่ผู้คนนิยมมาออกกำลังกายคือตอนเช้าตั้งแต่ 5.00 – 8.00 น. และตอนเย็น 16.00 – 20.00 น.

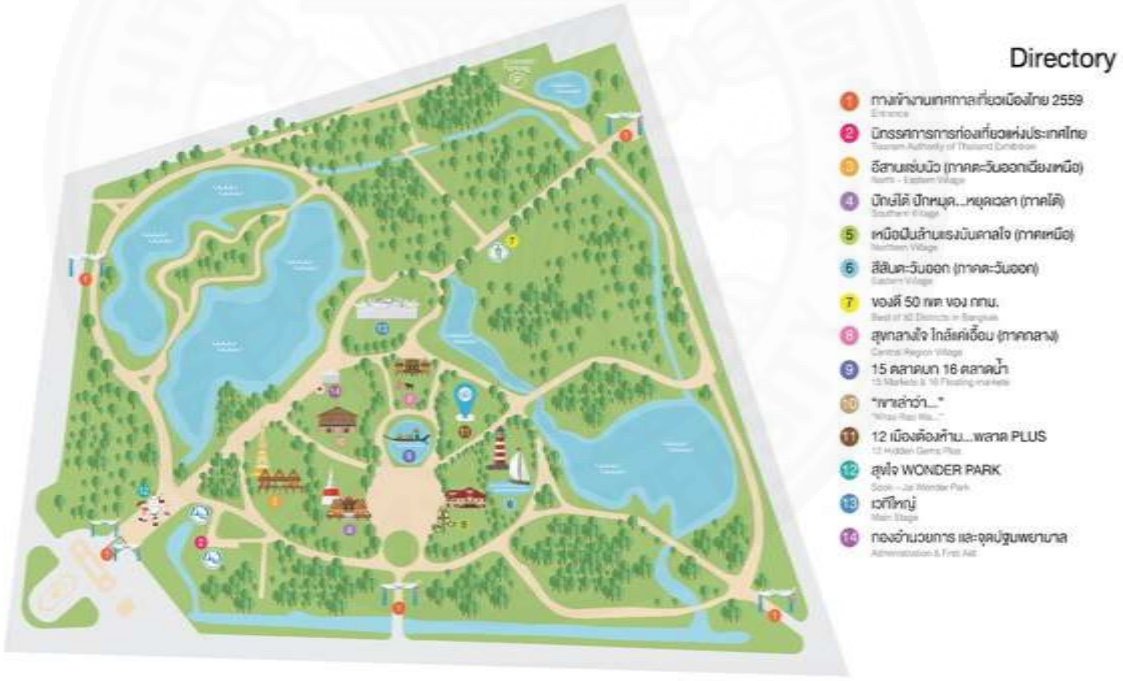
ภาพที่ 4.5 แผนผังแสดงเส้นทางการวิ่งในสวนลุมพินี . โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 4.6 การวิ่งออกกำลังกายในสวนลุมพินี. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 4.7 กลุ่มผู้ทำกายบริหารในสวนลุมพินี. โดย ผู้วิจัย, 2559

3. การจัดงานเทศกาล

สวนลุมพินียังเป็นพื้นที่สำหรับจัดงานเทศกาลต่าง ๆ ในหลายโอกาส ซึ่งงานเทศกาลที่ถูกจัดขึ้นมีทั้งงานที่จัดโดยหน่วยงานของรัฐบาลและงานที่จัดโดยหน่วยงานเอกชน และบางเทศกาลยังถูกจัดขึ้นเป็นประจำทุกปี เช่น เทศกาลเที่ยวเมืองไทย ที่จัดโดยการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย (ททท.) ร่วมกับกรุงเทพมหานคร (กทม.) มีจุดประสงค์เพื่อสร้างการรับรู้และกระตุ้นการท่องเที่ยวภายในประเทศ ผ่านการนำเสนอความเป็นเอกลักษณ์ของแต่ละท้องถิ่นในด้านวัฒนธรรม ประเพณี วิถีชีวิต และภูมิปัญญาท้องถิ่นจากทุกภูมิภาคของประเทศไทย นอกจากนี้ยังนำเสนอสินค้าท่องเที่ยวที่น่าสนใจและมีคุณภาพให้กับผู้เข้าชมงานอีกด้วย การจัดงานจึงเป็นการใช้พื้นที่หลายส่วนในสวนลุมพินีจัดเป็นโซนต่าง ๆ เพื่อจำลองบรรยากาศของแต่ละท้องถิ่นมาไว้ในสวน มีผู้เข้าชมงานเป็นจำนวนมากทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติ



ภาพที่ 4.8 แผนผังงานเที่ยวเมืองไทยประจำปี 2559

ที่มา: http://gupapai.com/?p=5712, 2016

ภาพที่ 4.9 กิจกรรมในงานเที่ยวเมืองไทยประจำปี 2559. จาก http://pantip.com/topic/34673475, 2016

ภาพที่ 4.10 กิจกรรมในงานเที่ยวเมืองไทยประจำปี 2559. จาก http://pantip.com/topic/34673475, 2016

4.2 การเลือกที่ตั้งศาลาอเนกประสงค์

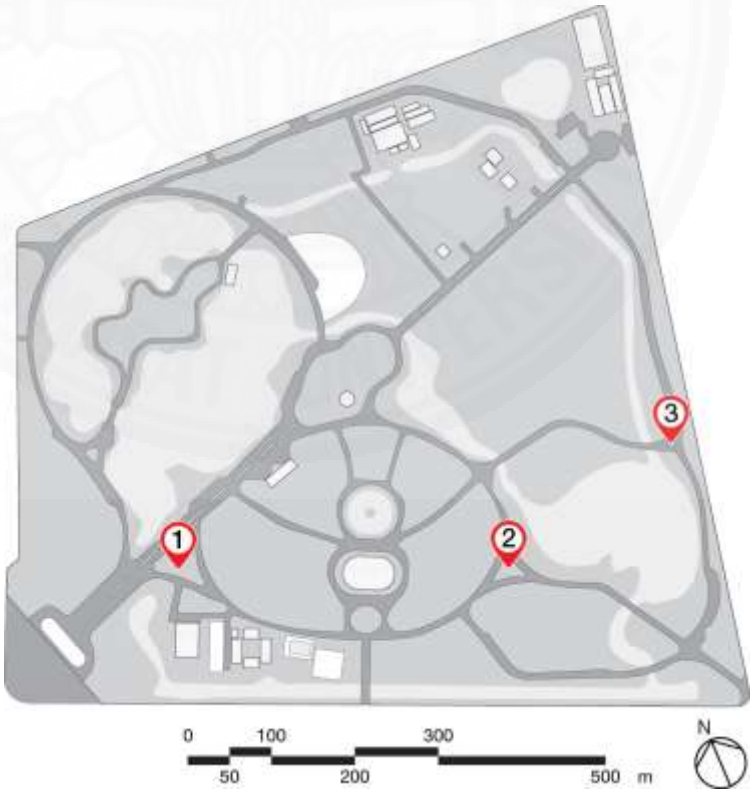
จากการศึกษากายภาพและบริบทของสวนลุมพินี ผู้วิจัยได้คัดเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะสร้างศาลาอเนกประสงค์ โดยพิจารณาจากเกณฑ์การเลือกที่ตั้ง มีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 เกณฑ์การเลือกที่ตั้ง

จากการวิเคราะห์บริบทพื้นที่ภายในสวนลุมพินี ที่ตั้งที่เหมาะสมจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. เป็นพื้นที่ว่างเกาะกลางที่เกิดจากการตัดถนนภายในสวนลุมพินี
2. เป็นพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงได้ง่ายจากพื้นที่กิจกรรมหลัก เช่น การออกกำลังกาย
3. เป็นพื้นที่ที่มีผู้คนมานั่งพักผ่อนเป็นประจำ
4. เป็นพื้นที่ที่ไม่ถูกใช้งานทับซ้อนกับกิจกรรมชั่วคราว เช่น การจัดงานเทศกาล

4.2.2 ที่ตั้งที่มีความเหมาะสม



ภาพที่ 4.11 แผนผังแสดงตำแหน่งพื้นที่ที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์. โดย ผู้วิจัย, 2559

จากการพิจารณาพื้นที่ภายในสวนลุมพินีตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ในเกณฑ์การเลือกที่ตั้ง ผู้วิจัยสามารถเลือกพื้นที่ที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์ได้ 3 จุด ดังนี้

ตารางที่ 4.1

เปรียบเทียบพื้นที่ที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์

ทัศนียภาพพื้นที่	รายละเอียดพื้นที่โดยสังเขป
	จุดที่ 1: เกาะกลางประติมากรรมกังหันชัยพัฒนา พื้นที่เกาะกลางรูปร่างสามเหลี่ยมขนาดประมาณ 1,800 ตารางเมตร เป็นที่ตั้งของประติมากรรมกังหันชัยพัฒนา และพื้นที่ส่วนที่เหลือเป็นพื้นที่สีเขียวซึ่งปลูกหญ้า ไม้พุ่ม และไม้ยืนต้นไว้เป็นสวนหย่อม อยู่ติดกับเส้นทางวิ่งหลักของสวนลุมพินี
	จุดที่ 2: เกาะกลางบริเวณเก๋งจีน พื้นที่เกาะกลางรูปร่างสามเหลี่ยมขนาดประมาณ 500 ตารางเมตร พื้นที่อยู่ห่างจากเส้นทางวิ่งหลักของสวนลุมพินีประมาณ 50 เมตร เป็นพื้นที่สีเขียวสลับกับพื้นที่ทางเดินที่เรียงด้วยคอนกรีตบล็อกตัวหนอน ในพื้นที่มีไม้พุ่มปลูกไว้บางส่วน มีม้านั่งสำหรับนั่งพักผ่อนวางอยู่ตามจุดต่าง ๆ
	จุดที่ 3: เกาะกลางบนเส้นทางเลียบถนนวิทยุ พื้นที่เกาะกลางรูปร่างสามเหลี่ยมขนาดประมาณ 100 ตารางเมตร เป็นพื้นคอนกรีตเกือบทั้งหมด มีกระถางคอนกรีตสำหรับปลูกไม้พุ่มเล็กน้อย มีเสาไฟสำหรับให้แสงสว่างและแท่นคอนกรีตสำหรับนั่งพักผ่อนเรียงตัวเป็นวงกลมอยู่ พื้นที่อยู่ติดกับเส้นทางวิ่งหลักของสวนลุมพินี

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

4.3 การประเมินความเหมาะสมของที่ตั้ง

การประเมินความเหมาะสมของที่ตั้งเป็นการพิจารณาคุณสมบัติและผลกระทบที่จะเกิดกับพื้นที่หากมีการสร้างศาลาอเนกประสงค์ขึ้น โดยสามารถกำหนดเกณฑ์การประเมินความเหมาะสมของที่ตั้งได้ดังนี้

1. หมวดสภาพแวดล้อมของพื้นที่
    - ผลกระทบต่อพื้นที่สีเขียวที่มีอยู่เดิม
    - ผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างที่มีอยู่เดิมในพื้นที่
    - ความยากในการปรับปรุงพื้นที่
    - ปริมาณขยะจากการปรับปรุงพื้นที่
2. หมวดการใช้งานพื้นที่
    - ผลกระทบต่อการสัญจรของกิจกรรมโดยรอบพื้นที่
    - ผลกระทบต่อกิจกรรมหลักที่เกิดขึ้นในพื้นที่
    - ผลกระทบต่อกิจกรรมชั่วคราวที่เกิดขึ้นในพื้นที่
    - ผลกระทบต่อกิจกรรมที่เกิดขึ้นโดยรอบพื้นที่
    - ความยากต่อการเข้าถึงพื้นที่

การประเมินที่ตั้งจุดที่ 1 จุดที่2 และจุดที่ 3 ของศาลาอเนกประสงค์จะเป็นการให้คะแนนโดยประเมินตามเกณฑ์ที่กำหนดขึ้นนี้ แล้วเปรียบเทียบผลการประเมินเพื่อคัดเลือกที่ตั้งที่มีความเหมาะสมที่สุด โดยผู้วิจัยเป็นผู้ประเมิน การให้คะแนนมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับพื้นที่ พื้นที่ที่เกิดผลกระทบน้อยที่สุดคือพื้นที่ที่มีความเหมาะสมที่สุด ผลการประเมินความเหมาะสมของที่ตั้งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.2

เปรียบเทียบการประเมินความเหมาะสมของที่ตั้ง

เกณฑ์การประเมิน	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1. หมวดสภาพแวดล้อมของพื้นที่			
・ผลกระทบต่อพื้นที่สีเขียวที่มีอยู่เดิม	3	2	1
・ผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างที่มีอยู่เดิมในพื้นที่	3	1	3
・ความยากในการปรับปรุงพื้นที่	2	1	2
・ปริมาณขยะจากการปรับปรุงพื้นที่	3	1	3
รวมผลการประเมินหมวดสภาพแวดล้อมของพื้นที่	11	5	9
2. หมวดการใช้งานพื้นที่			
・ผลกระทบต่อการสัญจรของกิจกรรมโดยรอบพื้นที่	1	1	2
・ผลกระทบต่อกิจกรรมหลักที่เกิดขึ้นในพื้นที่	3	1	2
・ผลกระทบต่อกิจกรรมชั่วคราวที่เกิดขึ้นในพื้นที่	1	1	1
・ผลกระทบต่อกิจกรรมที่เกิดขึ้นโดยรอบพื้นที่	1	1	2
・ความยากต่อการเข้าถึงพื้นที่	2	1	1
รวมผลการประเมินหมวดการใช้งานพื้นที่	8	5	8
รวมผลการประเมินทั้งหมด	19	10	17

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

จากการประเมินความเหมาะสมของที่ตั้ง ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าที่ตั้งจุดที่ 2 คือ พื้นที่เกาะกลางบริเวณเก๋งจีน เป็นจุดจะเกิดผลกระทบต่อพื้นที่น้อยที่สุด จึงเป็นพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะเป็นที่ตั้งของศาลาอเนกประสงค์

เมื่อได้ที่ตั้งที่เหมาะสมแล้ว ก่อนการออกแบบยังต้องกำหนดรายละเอียดการออกแบบเป็นการตั้งโจทย์ในการออกแบบศาลาอเนกประสงค์ เพื่อกำหนดขอบเขตของงานวิจัยให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4 รายละเอียดวัตถุประสงค์

4.4.1 เป้าหมาย

ออกแบบศาลาอเนกประสงค์ให้เป็นพื้นที่ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายรูปแบบ เป็นพื้นที่นั่งพักผ่อน พบปะพูดคุย จัดนิทรรศการ หรือการทำกิจกรรมรูปแบบอื่น ๆ ตามความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้พื้นที่ และก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ เพื่อให้ได้งานก่อสร้างที่มีคุณภาพและลดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการก่อสร้าง

4.4.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการออกแบบสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งให้มีโครงสร้างอยู่ได้ด้วยตัวเอง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงโครงสร้างของรูปทรง

2. ศึกษาการจัดทำแบบเพื่อการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการนำไปประกอบเป็นศาลาอเนกประสงค์

3. ศึกษากระบวนการประกอบชิ้นงานขึ้นรูปให้เป็นศาลาอเนกประสงค์ที่มีความมั่นคงแข็งแรงและคงทนต่อสภาพอากาศในประเทศไทย

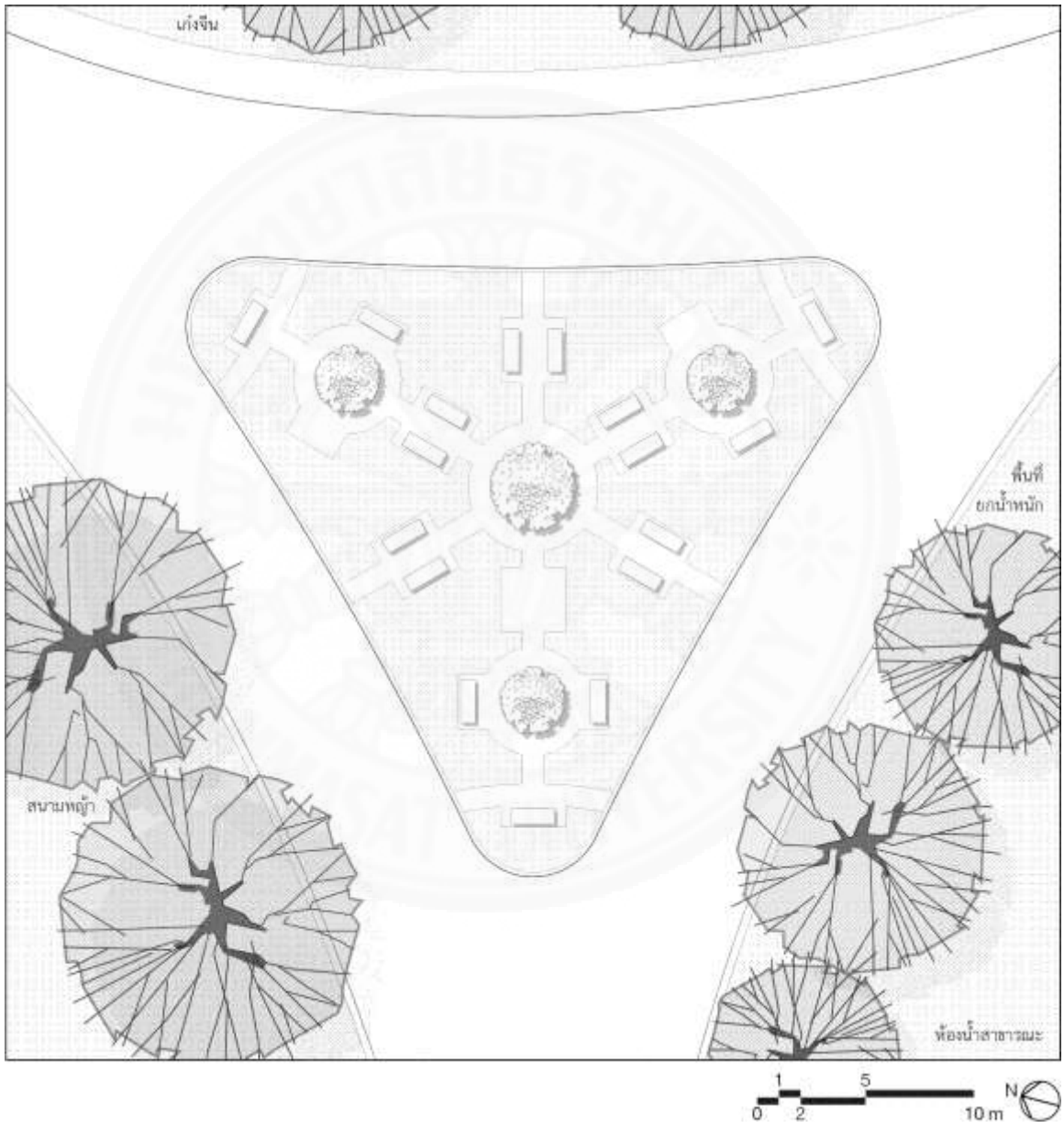
4. พัฒนาองค์ความรู้การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในงานสถาปัตยกรรม

4.4.3 แนวความคิดในการออกแบบ

ออกแบบศาลาอเนกประสงค์ให้เป็นรูปทรงเปลือกโค้งที่มีความสามารถในการคงรูปอยู่ได้ด้วยตัวเอง โดยอาศัยลักษณะของรูปทรงที่มีความสามารถในการถ่ายเทแรงอัดภายในได้ดี ซึ่งมีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์ที่มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดี

4.5 รายละเอียดสภาพแวดล้อมของที่ตั้งศาลาอเนกประสงค์

พื้นที่เกาะกลางบริเวณเก๋งจีนเป็นพื้นที่รูปร่างสามเหลี่ยมขนาดประมาณ 500 ตารางเมตร อยู่ห่างจากเส้นทางวิ่งหลักของสวนลุมพินีประมาณ 50 เมตร เป็นพื้นที่สีเขียวสลับกับพื้นที่ทางเดินที่เรียงด้วยคอนกรีตบล็อกตัวหนอน ในพื้นที่มีไม้พุ่มปลูกไว้และมีม้านั่งสำหรับนั่งพักผ่อนอยู่ตามจุดต่าง ๆ



ภาพที่ 4.12 ผังพื้นที่เกาะกลางบริเวณเก๋งจีน. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 4.13 ทัศนียภาพพื้นที่เมื่อมองจากเส้นทางวิ่งหลัก. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 4.14 ทัศนียภาพพื้นที่เกาะกลางบริเวณเก๋งจีน. โดย ผู้วิจัย, 2559

พื้นที่โดยรอบเกาะกลางบริเวณเก๋งจีนทั้ง 3 ด้าน ประกอบด้วยพื้นที่สนามหญ้าขนาดใหญ่ สำหรับจัดกิจกรรมในโอกาสต่าง ๆ มีพื้นที่สำหรับออกกำลังกายประเภทยกน้ำหนัก ห้องน้ำสาธารณะ และในพื้นที่ส่วนที่ติดแอ่งน้ำขนาดใหญ่จะเป็นที่ตั้งของเก๋งจีน (สถาปัตยกรรมรูปแบบจีน) เป็นศาลาริมน้ำสำหรับนั่งพักผ่อน

ภาพที่ 4.15 ทัศนียภาพพื้นที่เกาะกลางบริเวณเก๋งจีน. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 4.16 พื้นที่สำหรับออกกำลังกายประเภทยกน้ำหนัก. โดย ผู้วิจัย, 2559

4.6 รายละเอียดกิจกรรม

4.6.1 หน้าที่ใช้สอยและกิจกรรม

ศาลาอเนกประสงค์มีหน้าที่ใช้สอยหลักคือการเป็นพื้นที่สำหรับนั่งพักผ่อนในสวนสาธารณะ รองรับการนั่งพักผ่อนหลังจากการออกกำลังกายของผู้คนในพื้นที่และผู้คนที่มาเดินเล่นสูดอากาศในสวนสาธารณะ นอกจากนี้ยังพื้นที่ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายรูปแบบ เช่น เป็นพื้นที่พบปะพูดคุย จัดนิทรรศการ หรือการทำกิจกรรมรูปแบบอื่น ๆ ตามความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้พื้นที่

4.6.2 กลุ่มผู้ใช้งานศาลาอเนกประสงค์

กลุ่มผู้ใช้งานสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่มานั่งพักผ่อน กลุ่มที่มาพบปะพูดคุยกัน และกลุ่มที่ใช้งานพื้นที่อเนกประสงค์ โดยมีรายละเอียดและพฤติกรรมผู้ใช้งานแต่ละกลุ่มดังนี้

4.6.2.1 กลุ่มที่มานั่งพักผ่อน เป็นกลุ่มผู้ใช้ที่มาออกกำลังกายในสวนลุมพินี ซึ่งในบริเวณพื้นที่จะมีกลุ่มผู้ที่มาวิ่งออกกำลังกายและกลุ่มผู้ยกน้ำหนัก นอกจากนี้จะมีกลุ่มที่มาเดินเล่นในสวนลุมพินี ซึ่งกลุ่มนี้นอกจากการเดินเล่นแล้วยังมีความต้องการพื้นที่สำหรับนั่งพักผ่อนด้วยเช่นกัน

4.6.2.2 กลุ่มที่มาพบปะพูดคุยกัน เป็นกลุ่มผู้ใช้มาใช้งานพื้นที่มากกว่า 2 คน ต้องการพื้นที่สำหรับนั่งสนทนาหรือทำกิจกรรมบางอย่างร่วมกัน

4.6.2.3 กลุ่มที่ใช้งานพื้นที่อเนกประสงค์ เป็นกลุ่มผู้ใช้ที่มีการประยุกต์การใช้งานพื้นที่สำหรับทำกิจกรรมรูปแบบอื่น ๆ เช่น การจัดนิทรรศการ เป็นต้น

บทที่ 5
การออกแบบและก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์

ในกระบวนการออกแบบและก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งที่มีโครงสร้างอยู่ได้ด้วยตัวเอง สามารถแบ่งขั้นตอนการศึกษาได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

5.1 การกำหนดแนวคิดเพื่อใช้เป็นหลักในการออกแบบศาลาอเนกประสงค์

5.2 การออกแบบรูปทรงของศาลาอเนกประสงค์ โดยอาศัยทฤษฎีการสร้างรูปทรงทางสถาปัตยกรรมสร้างเป็นรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งที่มีความสามารถในเชิงโครงสร้าง

5.3 การออกแบบโครงสร้างตามความเหมาะสมของรูปทรงศาลาร้านค้าชั่วคราว โดยอาศัยทฤษฎีการสร้างรูปทรงทางสถาปัตยกรรม และศึกษาหลักการจากกรณีศึกษา

5.4 การประเมินความเป็นไปได้ในเชิงโครงสร้าง (Simulation)

5.5 การจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ โดยคำนึงถึงรูปแบบของข้อต่อและวิธีการประกอบชิ้นงาน

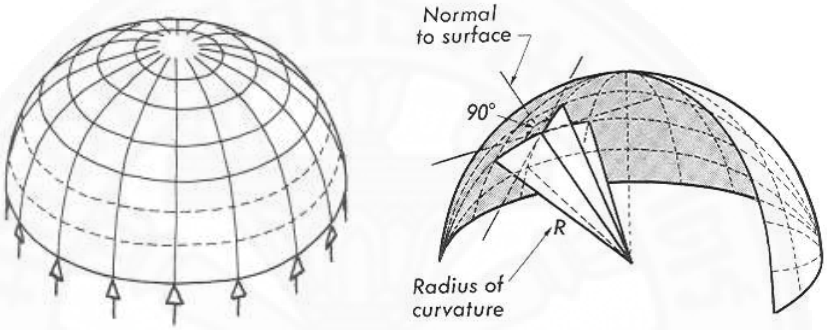
5.6 การศึกษาวิธีการประกอบชิ้นงานและขั้นตอนการก่อสร้าง

5.7 การประเมินผลการออกแบบและความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง

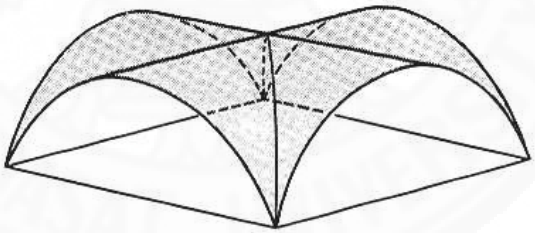
ภาพที่ 5.1 ขั้นตอนการศึกษาในกระบวนการออกแบบและก่อสร้าง. โดย ผู้วิจัย, 2559

5.1 แนวความคิดในการออกแบบ

จากการศึกษาทฤษฎีการสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งสามารถสรุปได้ว่า รูปทรงเปลือกโค้งที่มีความสามารถในเชิงโครงสร้าง จะต้องมีแรงอัดหรือแรงดึงอยู่ภายใน เพื่อให้รูปทรงสามารถคงรูปอยู่ได้ด้วยตัวเอง โดยที่แรงอัดหรือแรงดึงนั้นจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องและทำมุมกับพื้นผิวในองศาที่เหมาะสม หลักการนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรม ดังที่เห็นได้จากการสร้างซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) โครงสร้างทรงโค้ง (vault) โครงสร้างประเภทโดม (dome) และรูปทรงเปลือกโค้ง (shell) รูปแบบต่าง ๆ



ภาพที่ 5.2 (ซ้าย) แรงอัดและแรงดึงภายในโดม และ (ขวา) แรงที่ทำมุมในองศาที่เหมาะสม. จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Halcl Inc.



ภาพที่ 5.3 groined vault. จาก Structure in Architecture, M.G. Salvadori, 1963, New Jersey: Prentice-Hall Inc.

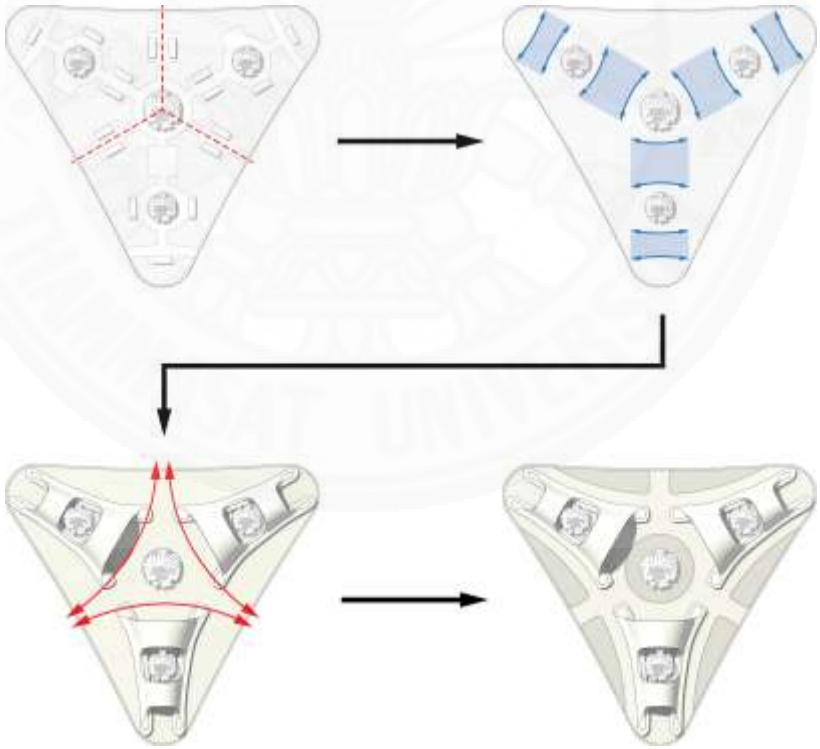
ดังนั้นแนวความคิดในการออกแบบคือการออกแบบให้รูปทรงของศาลามีการถ่ายเทแรงอัดและแรงดึงอยู่ภายใน โดยที่รูปทรงที่ออกแบบสามารถตอบสนองการใช้งานเป็นศาลาอเนกประสงค์ได้อย่างเหมาะสม

5.2 การออกแบบรูปทรงศาลาอเนกประสงค์

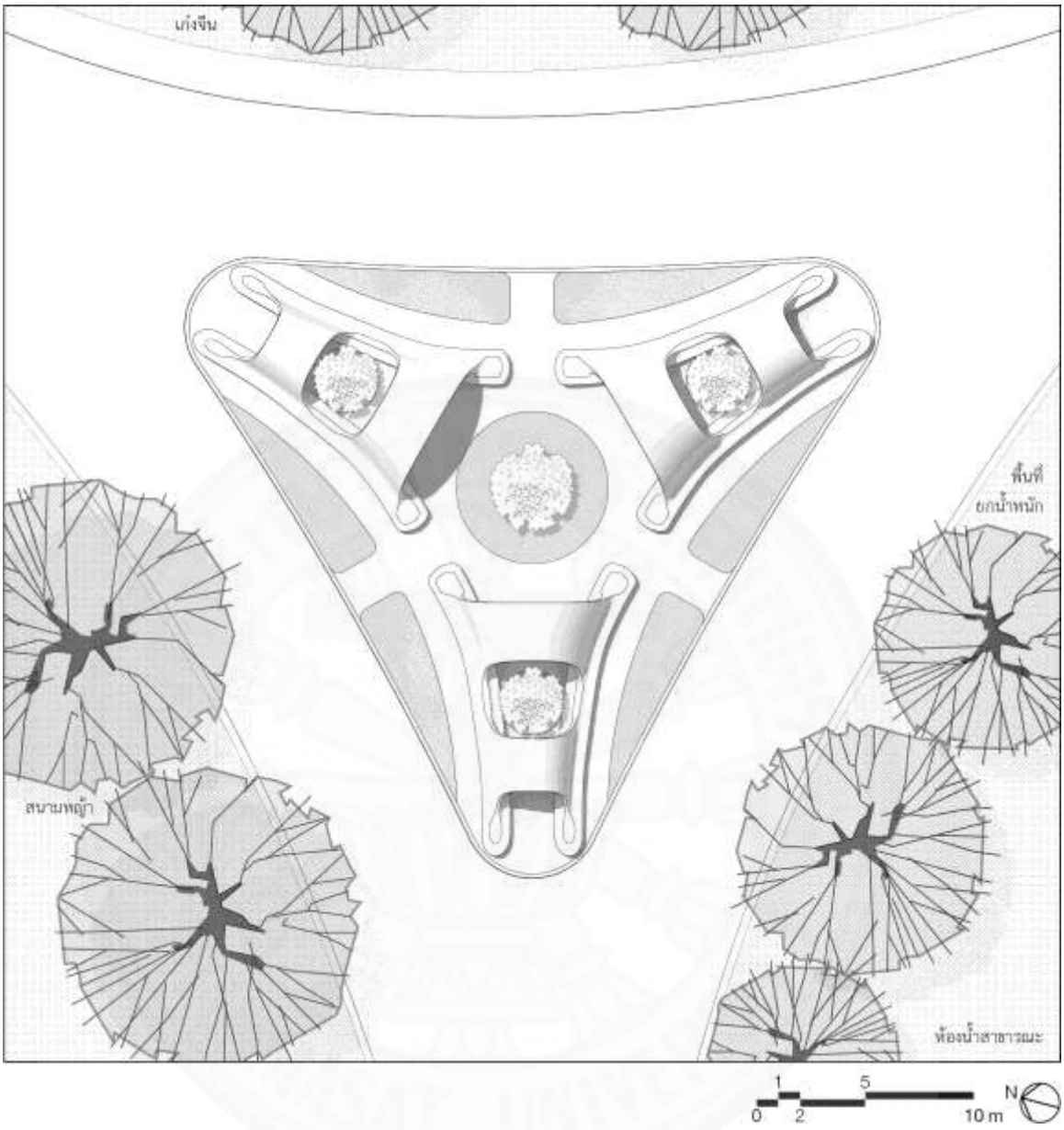
จากการใช้แนวความคิดในการออกแบบเป็นการสร้างรูปทรงให้มีทั้งแรงอัดและแรงดึงอยู่ภายใน โดยเป็นการประยุกต์หลักการออกแบบรูปทรงซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) และโครงสร้างทรงโค้ง (vault) มาใช้ในการออกแบบรูปทรงของศาลา เมื่อทำการออกแบบบนพื้นที่ สามารถสร้างรูปทรงได้ 2 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดของการออกแบบดังนี้

5.2.1 ศาลารูปแบบที่ 1

เป็นการแบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 ส่วนตามแนวเส้นประ แล้วสร้างรูปทรงซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) ในพื้นที่ทั้ง 3 ส่วน โดยเลือกที่จะเก็บรักษาไม้พุ่มในพื้นที่ไว้ทุกต้น จากนั้นจึงปรับรูปทรงให้สามารถใช้งานเป็นม้านั่งได้ และออกแบบพื้นที่ให้สามารถเข้าถึงส่วนกลางได้โดยง่ายเพื่อรองรับการกิจกรรมหลากหลายรูปแบบ



ภาพที่ 5.4 ขั้นตอนวางผังและออกแบบศาลารูปแบบที่ 1. โดย ผู้วิจัย, 2559



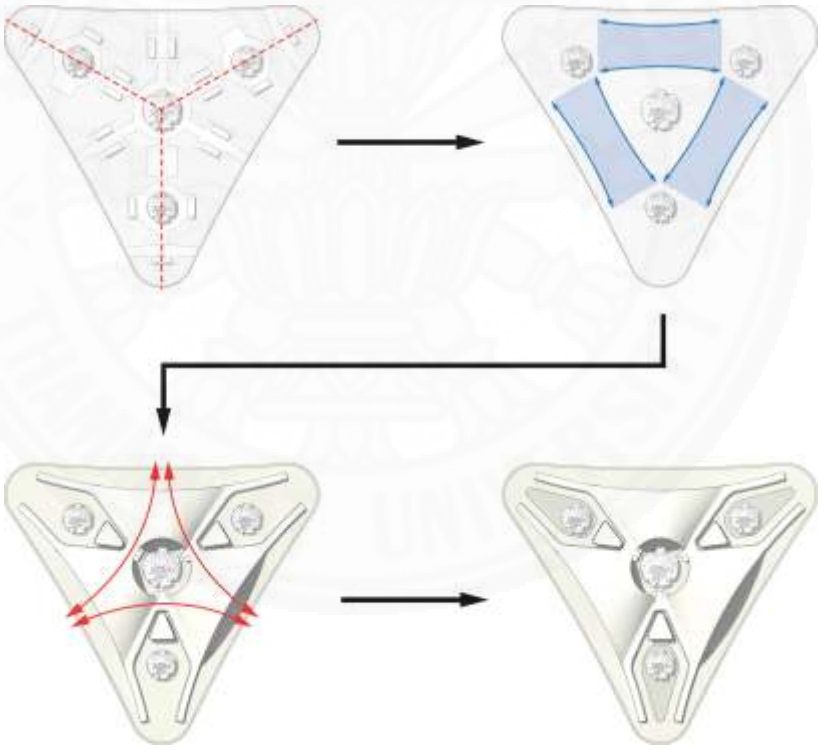
ภาพที่ 5.5 ผังพื้นที่ของศาลารูปแบบที่ 1. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.6 รูปด้านรูปที่ 1 ของศาลารูปแบบที่ 1. โดย ผู้วิจัย, 2559

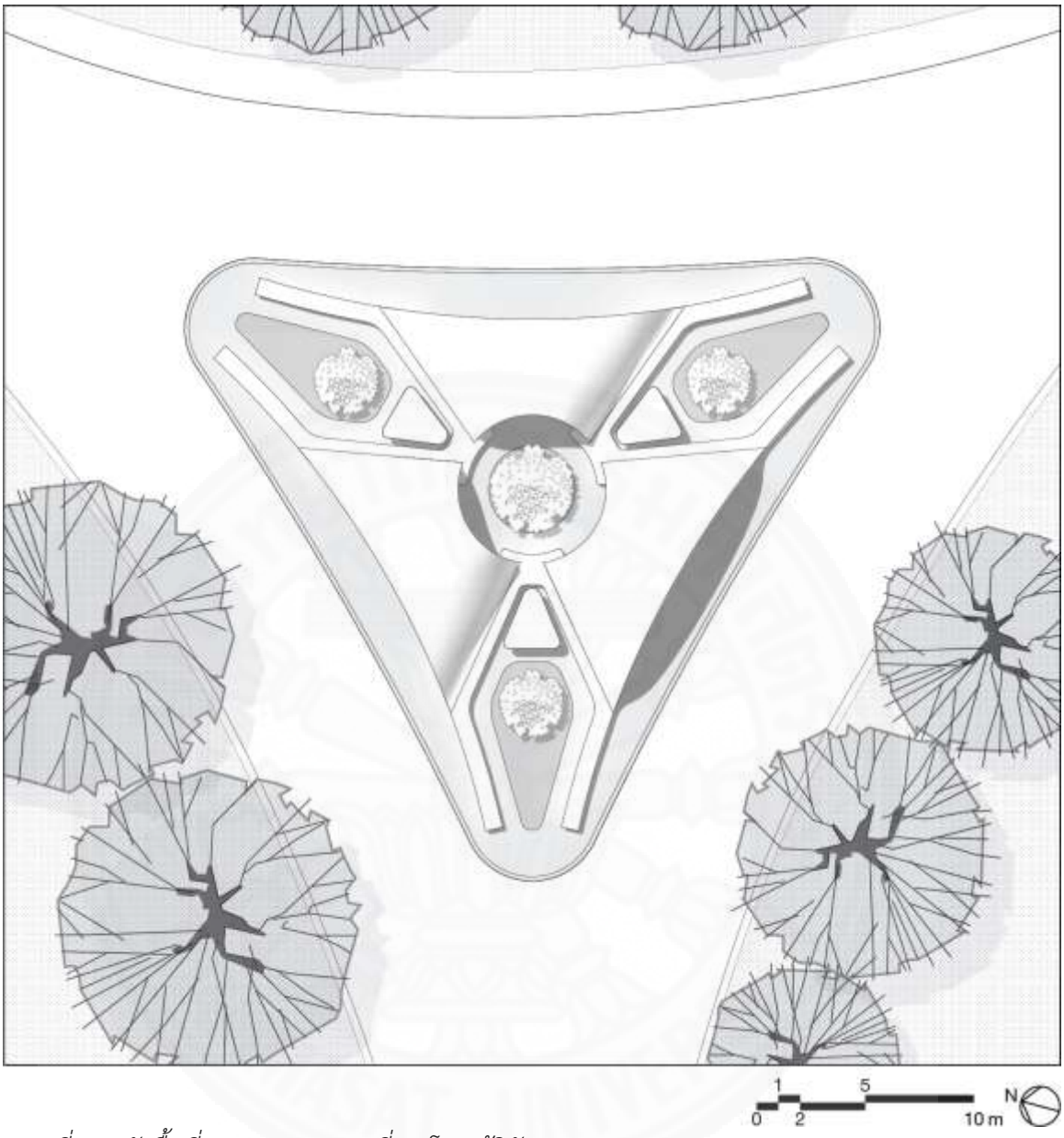
ภาพที่ 5.7 รูปด้านรูปที่ 2 ของศาลารูปแบบที่ 1. โดย ผู้วิจัย, 2559

5.2.2 ศาลารูปแบบที่ 2

เป็นการแบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 ส่วนตามแนวเส้นประ แล้วสร้างรูปทรงซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) ในพื้นที่ทั้ง 3 ส่วน โดยเลือกที่จะเก็บรักษาไม้พุ่มในพื้นที่ไว้ทุกต้น ออกแบบพื้นที่ให้สามารถเข้าถึงส่วนกลางได้โดยง่ายและให้พื้นที่ส่วนที่อยู่ภายในรูปทรงช่องโค้งเป็นพื้นที่โล่งเพื่อรองรับกิจกรรมหลากหลายรูปแบบ และปรับรูปทรงในพื้นที่ระหว่างรูปทรงช่องโค้งให้สามารถใช้งานเป็นม้านั่งได้



ภาพที่ 5.8 ขั้นตอนวางผังและออกแบบศาลารูปแบบที่ 2. โดย ผู้วิจัย, 2559



ภาพที่ 5.9 ผังพื้นที่ของศาลารูปแบบที่ 2. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.10 รูปด้านรูปที่ 1 ของศาลารูปแบบที่ 2. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.11 รูปด้านรูปที่ 2 ของศาลารูปแบบที่ 2. โดย ผู้วิจัย, 2559

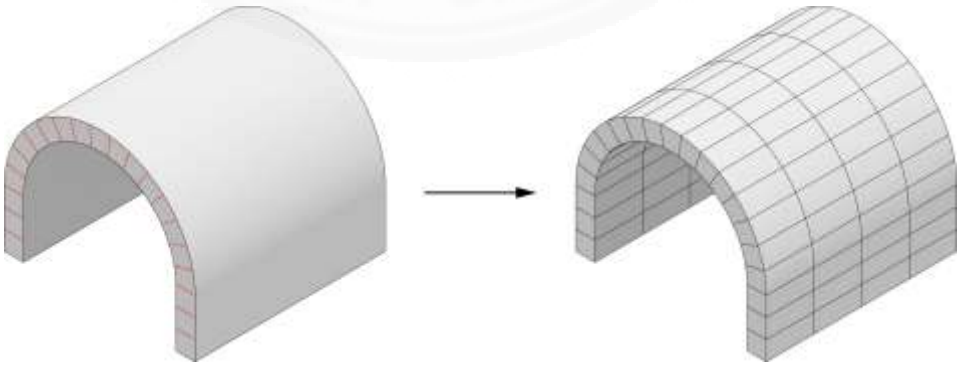
จากการออกแบบศาลาทั้ง 2 รูปแบบ ผู้วิจัยได้เลือกศาลารูปแบบที่ 2 มาศึกษาและพัฒนาแบบต่อ เนื่องจากศาลารูปแบบที่ 2 เป็นรูปแบบที่ผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถตอบสนองการใช้งานของผู้ใช้ได้ดีกว่ารูปแบบที่ 1 จากการที่มีพื้นที่ในร่มที่กว้างกว่า มีการแยกพื้นที่สำหรับกิจกรรมแบบส่วนรวมและกิจกรรมแบบส่วนตัวอย่างชัดเจน อีกทั้งยังมีมีความท้าทายในด้านการออกแบบโครงสร้างมากกว่า จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาและพัฒนาแบบต่อไป

5.3 การออกแบบโครงสร้างศาลาอเนกประสงค์

การออกแบบโครงสร้างเพื่อให้ศาลา สามารถตั้งอยู่ได้ด้วยตัวเอง เป็นการนำหลักการออกแบบซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากตัวรูปทรงของศาลาเองก็ถูกสร้างขึ้นจากการประยุกต์หลักการสร้างซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) เช่นกัน

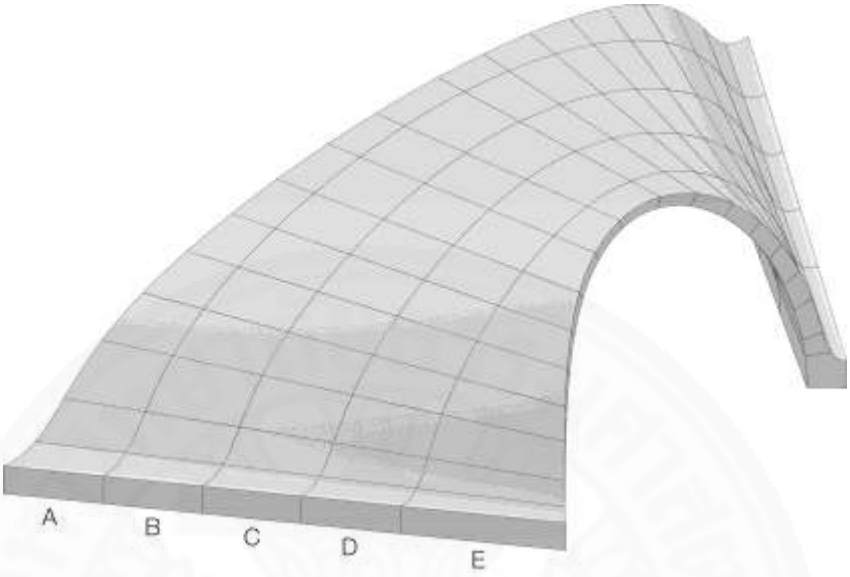
5.3.1 การทอนรูปทรงศาลาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย

การทอนรูปทรงศาลาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเป็นการนำหลักการเรียงอิฐซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) มาใช้เพื่อให้ชิ้นส่วนมีการถ่ายเทแรงภายในรูปทรงและคงรูปอยู่ได้ด้วยตัวเอง

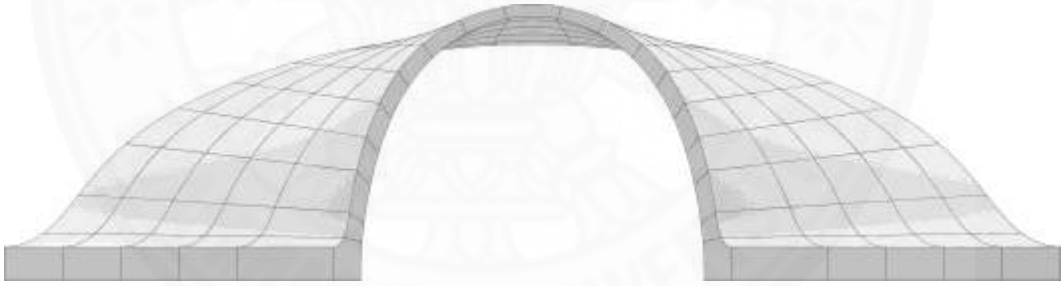


ภาพที่ 5.12 หลักการเรียงอิฐซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) . โดย ผู้วิจัย, 2559

เมื่อนำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการทอนรูปทรงของศาลารูปแบบที่ 2 ออกเป็นชิ้นส่วนย่อย จะได้ผลจากการทอนรูปทรงออกมาเป็นแบบดังนี้



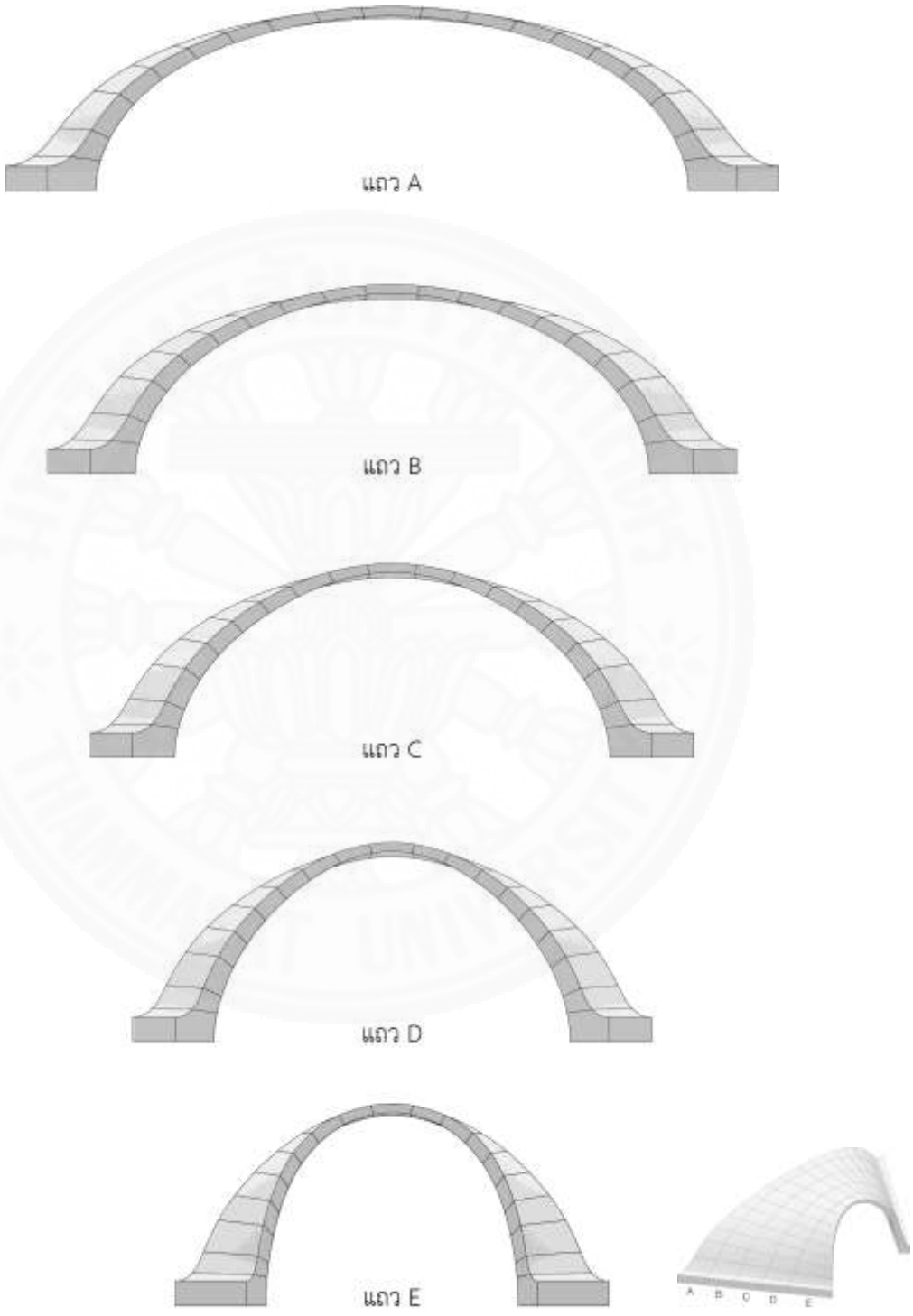
ภาพที่ 5.13 การทอนรูปทรงศาลาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย. โดย ผู้วิจัย, 2559



ภาพที่ 5.14 รูปด้านที่ 1 ของศาลาที่ทอนรูปทรงแล้ว. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.15 รูปด้านที่ 2 ของศาลาที่ทอนรูปทรงแล้ว. โดย ผู้วิจัย, 2559

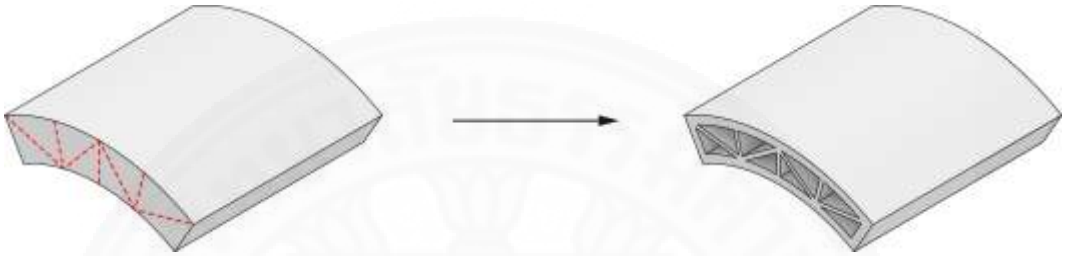
เนื่องจากรูปทรงของศาลาทั้ง 2 ด้านมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน ดังนั้นการทอนรูปทรงในหน้าตัดแต่ละส่วนของศาลาจึงต้องปรับเปลี่ยนไปตามรูปทรงที่เปลี่ยนไปด้วย



ภาพที่ 5.16 การทอนรูปทรงของศาลาในแต่ละแถว. โดย ผู้วิจัย, 2559

5.3.2 การออกแบบโครงสร้างภายในชิ้นส่วน

การออกแบบโครงสร้างภายในชิ้นส่วนเป็นการลดมวลของชิ้นส่วนให้น้อยลงและยังคงความแข็งแรงของชิ้นส่วนไว้ได้ สามารถทำได้โดยออกแบบให้หน้าตัดของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีลักษณะเป็นโครงถัก (truss) สามเหลี่ยมย่อยภายใน ผลที่ได้คือชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเบาลงและยังคงความสามารถในการรับแรงได้ในทิศทางที่ชิ้นส่วนนั่นจำเป็นจะต้องรับอย่างเหมาะสม

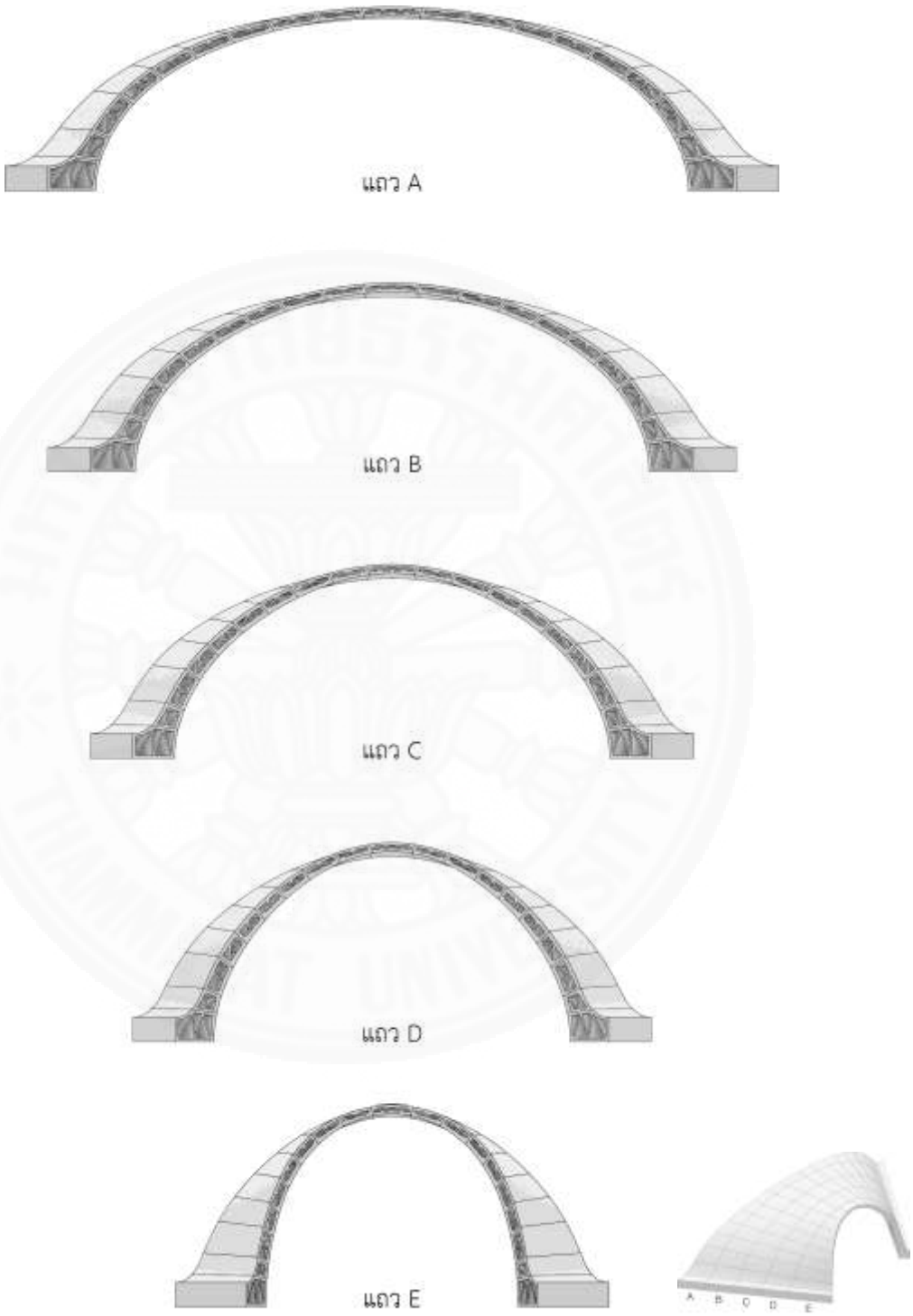


ภาพที่ 5.17 แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างภายใน. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.18 รูปด้านที่ 1 ของศาลาที่ออกแบบโครงสร้างภายในแล้ว. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.19 รูปด้านที่ 2 ของศาลาที่ออกแบบโครงสร้างภายในแล้ว. โดย ผู้วิจัย, 2559

เนื่องจากรูปทรงของศาลาทั้ง 2 ด้านและชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างในหน้าตัดแต่ละส่วนจึงต้องปรับเปลี่ยนไปตามรูปทรงที่เปลี่ยนไปด้วย



ภาพที่ 5.20 การออกแบบโครงสร้างภายในชิ้นส่วนแต่ละแถว. โดย ผู้วิจัย, 2559

5.4 การประเมินความเป็นไปได้ในเชิงโครงสร้าง

การประเมินความเป็นไปได้ในเชิงโครงสร้างจะประเมินโดยการจำลองผ่านโปรแกรมประเมินโครงสร้าง Autodesk Inventor Professional 2016 โดยกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ของศาลาอเนกประสงค์ให้มีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุดซึ่งประกอบด้วยวัสดุของชิ้นงาน กำหนดให้เป็นคอนกรีต (Concrete) โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุตามมาตรฐานของคอนกรีตทั่วไป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.1

คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีต (Concrete)

Material	Concrete	
General	Mass Density	2.41 g/cm^3
	Compressive Strength	24.0 MPa
	Ultimate Tensile Strength	2.41 MPa (24.61 kg/cm^2)
Stress	Young's Modulus	23.25 GPa (237084.02 kg/cm^3)
	Poisson's Ratio	0.167 ul
	Shear Modulus	9.96 GPa (101578.42 kg/cm^3)

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

การวิเคราะห์ความเค้น (Stress Analysis) เป็นการจำลองแบบอยู่นิ่ง (Static Analysis) คือ การคำนวณเฉพาะน้ำหนังของวัตถุโดยที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ กำหนดน้ำหนักของชิ้นส่วนศาลาแต่ละชิ้นจากการคำนวณตามสูตร W = mg เมื่อ W คือ น้ำหนัก m คือ มวลของวัตถุ และ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (9.81 m/s^2) ซึ่งเป็นการคำนวณโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม Autodesk Inventor Professional 2016 ทั้งหมด ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความเค้น (Stress Analysis) จะเป็นการแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนของศาลาอเนกประสงค์ และความเป็นไปได้ที่ชิ้นส่วนของศาลาจะเสียรูปจากการรับแรง (Displacement) มีรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ดังนี้

5.4.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพของศาลาอเนกประสงค์

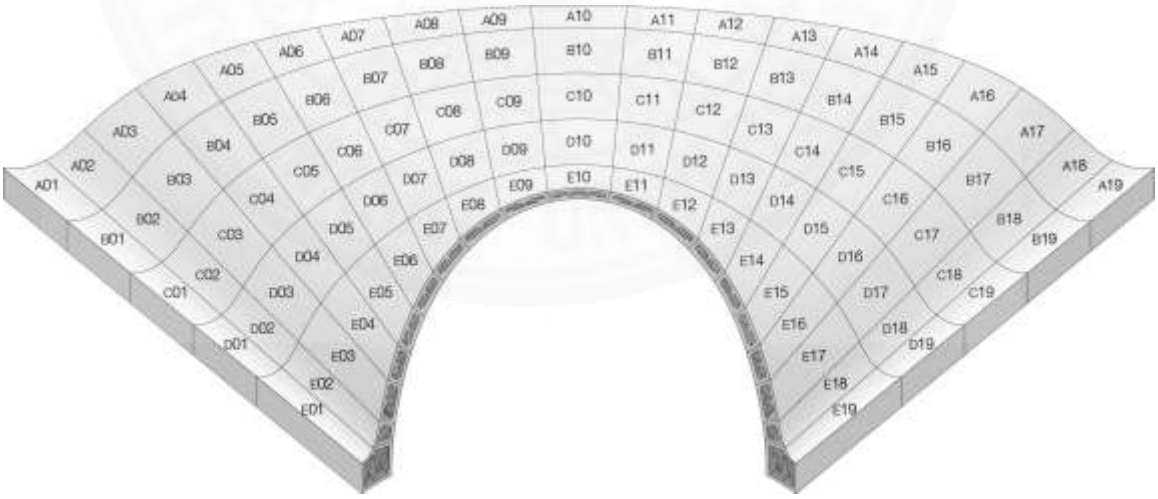
ผลจากการวิเคราะห์ได้แสดงคุณสมบัติเชิงภายภาพของศาลาอเนกประสงค์ที่ถูกกำหนดให้ใช้วัสดุคอนกรีต (Concrete) ในการก่อสร้าง มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.2

คุณสมบัติเชิงกายภาพของศาลาอเนกประสงค์ที่ใช้วัสดุคอนกรีต (Concrete)

วัสดุ (Material)	Concrete
ความหนาแน่น (Density)	2.40731 g/cm^3
น้ำหนัก (Mass)	30069 kg
ปริมาตร (Volume)	12.4907 m^3
พื้นที่ผิว (Area)	524.96 m^2

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559



ภาพที่ 5.21 รหัสและตำแหน่งการวางชิ้นส่วนแต่ละชิ้น. โดย ผู้วิจัย, 2559

ตารางที่ 5.3

คุณสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์แต่ละชิ้น

รหัสชิ้นส่วน Part Number	น้ำหนัก (กิโลกรัม) Mass (kg)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร) Volume (m^3)
A01	499.428	0.207
A02	271.912	0.113
A03	306.005	0.127
A04	253.448	0.105
A05	223.704	0.093
A06	197.076	0.082
A07	177.333	0.074
A08	177.130	0.074
A09	150.355	0.062
A10	180.540	0.075
A11	150.355	0.062
A12	177.130	0.074
A13	177.333	0.074
A14	197.076	0.082
A15	223.704	0.093
A16	253.448	0.105
A17	306.005	0.127
A18	271.912	0.113
A19	499.428	0.207

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

คุณสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์แต่ละชิ้น

รหัสชิ้นส่วน Part Number	น้ำหนัก (กิโลกรัม) Mass (kg)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร) Volume (m^3)
B01	521.155	0.216
B02	300.176	0.125
B03	376.551	0.156
B04	345.504	0.144
B05	343.422	0.143
B06	331.093	0.138
B07	321.013	0.133
B08	339.259	0.141
B09	297.881	0.124
B10	356.819	0.148
B11	297.881	0.124
B12	339.259	0.141
B13	321.013	0.133
B14	331.093	0.138
B15	343.422	0.143
B16	345.504	0.144
B17	376.551	0.156
B18	300.176	0.125
B19	521.155	0.216

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

คุณสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์แต่ละชิ้น

รหัสชิ้นส่วน Part Number	น้ำหนัก (กิโลกรัม) Mass (kg)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร) Volume (m^3)
C01	502.343	0.209
C02	281.877	0.117
C03	367.905	0.153
C04	274.281	0.141
C05	343.507	0.143
C06	328.883	0.137
C07	314.536	0.131
C08	325.071	0.135
C09	279.450	0.116
C10	325.092	0.135
C11	279.450	0.116
C12	325.071	0.135
C13	314.536	0.131
C14	328.883	0.137
C15	343.507	0.143
C16	274.281	0.141
C17	367.905	0.153
C18	281.877	0.117
C19	502.343	0.209

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

คุณสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์แต่ละชิ้น

รหัสชิ้นส่วน Part Number	น้ำหนัก (กิโลกรัม) Mass (kg)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร) Volume (m^3)
D01	480.570	0.200
D02	257.655	0.107
D03	349.792	0.145
D04	320.810	0.133
D05	330.048	0.137
D06	254.641	0.131
D07	298.600	0.124
D08	304.032	0.126
D09	258.400	0.107
D10	292.948	0.122
D11	258.400	0.107
D12	304.032	0.126
D13	298.600	0.124
D14	254.641	0.131
D15	330.048	0.137
D16	320.810	0.133
D17	349.792	0.145
D18	257.655	0.107
D19	480.570	0.200

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

คุณสมบัติเชิงกายภาพของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์แต่ละชิ้น

รหัสชิ้นส่วน Part Number	น้ำหนัก (กิโลกรัม) Mass (kg)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร) Volume (m^3)
E01	664.506	0.276
E02	308.160	0.128
E03	420.361	0.175
E04	357.173	0.148
E05	342.243	0.142
E06	290.800	0.121
E07	237.467	0.099
E08	198.158	0.082
E09	138.003	0.057
E10	139.605	0.058
E11	138.003	0.057
E12	198.158	0.082
E13	237.467	0.099
E14	290.800	0.121
E15	342.243	0.142
E16	357.173	0.148
E17	420.361	0.175
E18	308.160	0.128
E19	664.506	0.276

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

5.4.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้น (Stress Analysis)

การวิเคราะห์ความเค้นจะได้ผลการวิเคราะห์เป็นการแสดงความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนของศาลาอเนกประสงค์ (Principal Stress) การเสียรูปจากการรับแรง (Displacement) และค่าความปลอดภัย (Safety Factor) มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.4

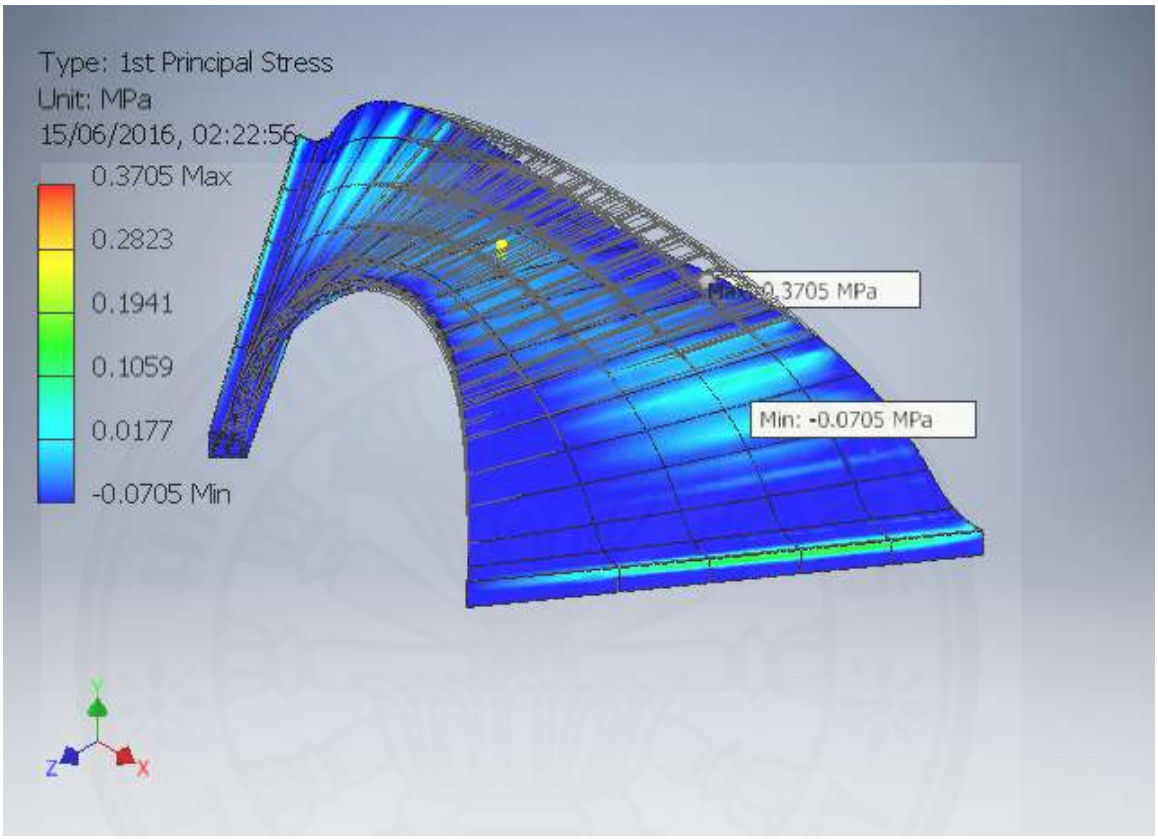
สรุปผลการวิเคราะห์ความเค้น

Results	Minimum	Maximum
1st Principal Stress	-0.0704906 MPa (-0.7188 kg/cm^2)	0.370545 MPa (3.77851 kg/cm^2)
Displacement	0 mm	0.350284 mm
Safety Factor	2 ul	15 ul

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.22 การวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์. โดย ผู้วิจัย, 2559

ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนของศาลาอเนกประสงค์ (Principal Stress) มีค่าต่ำสุด (Minimum) อยู่ที่ -0.07 MPa หรือ -0.72 kg/cm^2 และมีค่าสูงสุด (Maximum) อยู่ที่ 0.37 MPa หรือ 3.78 kg/cm^2



ภาพที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์ความเค้นของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์. โดย ผู้วิจัย, 2559

การประเมินจะพิจารณาจากค่าความเค้นอัดที่ยอมให้ (Allowable Compressive Stress) โดยคำนวณจากสูตร 0.25 fc' เมื่อ fc' คือ กำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 250 kg/cm^2

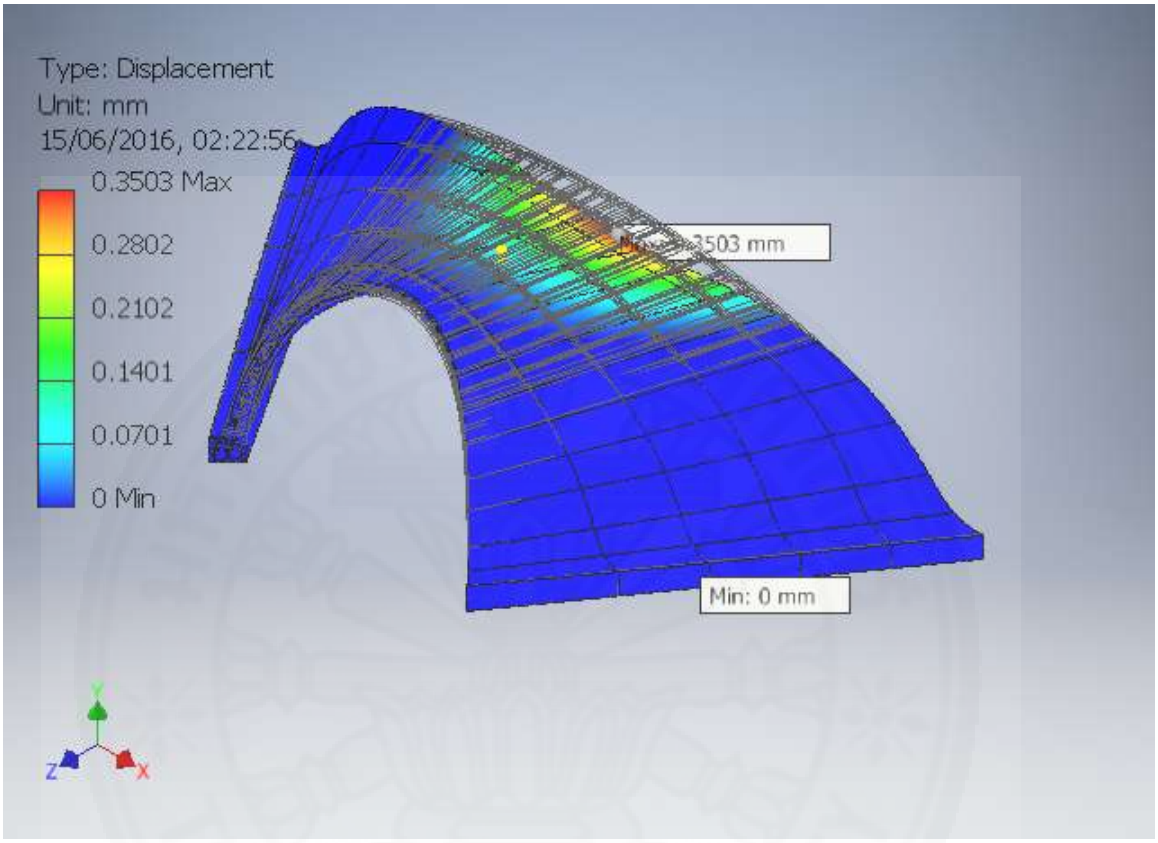
$$Fc = 0.25\ fc'$$

$$= 0.25\ (250)$$

$$= 62.5\ kg/cm^2$$

เมื่อพิจารณาค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในศาลาอเนกประสงค์ คือ 3.78 kg/cm^2 พบว่ามีค่าต่ำกว่าความเค้นอัดที่ยอมให้ คือ 62.5 kg/cm^2 จึงสรุปได้ว่าชิ้นส่วนสามารถทนต่อแรงอัดที่เกิดขึ้นภายในรูปทรงของศาลาอเนกประสงค์ได้

การเสียรูปจากการรับแรง (Displacement) ของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด (Minimum) อยู่ที่ 0 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด (Maximum) อยู่ที่ 0.35 มิลลิเมตร



ภาพที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์การเสียรูปจากการรับแรงของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์. โดย ผู้วิจัย, 2559

การประเมินจะพิจารณาจากค่าการเสียรูปที่จำกัด (Limitation of Displacement) โดยคำนวณจากสูตร l/360 เมื่อ l คือ ความยาวของระยะ (span) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13000 มิลลิเมตร

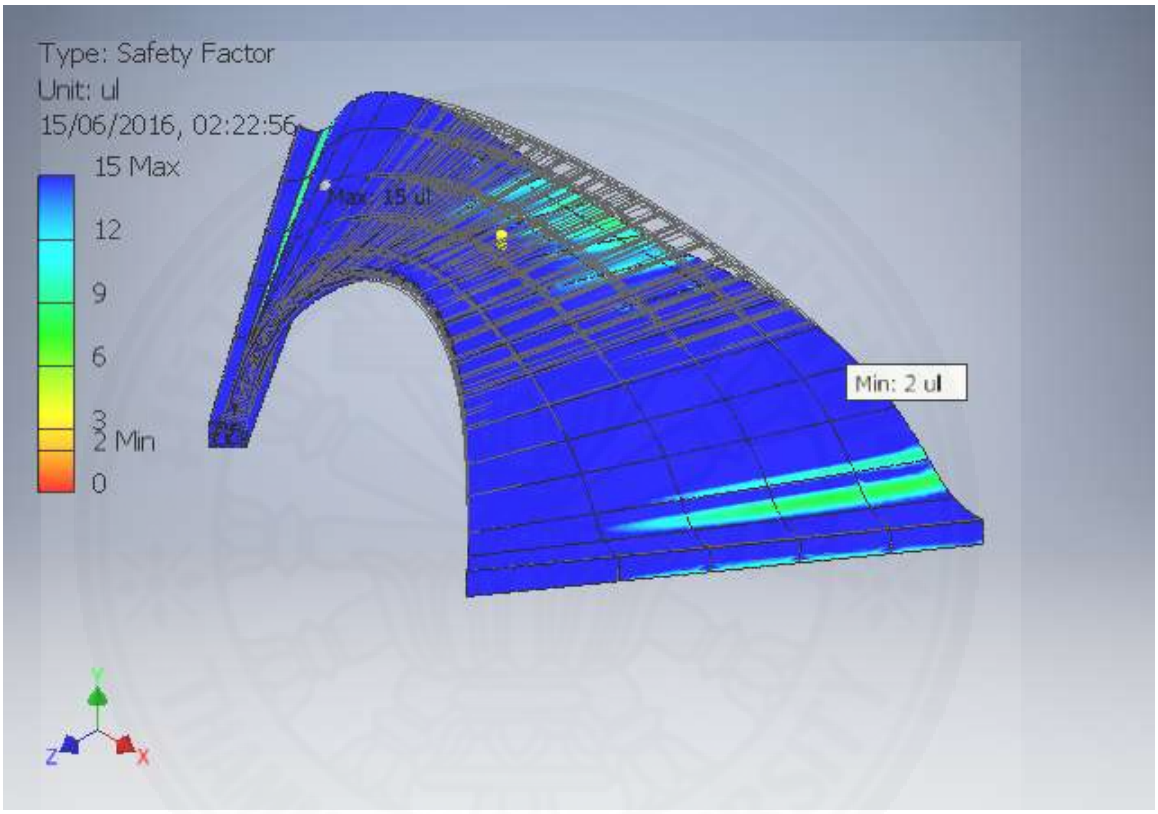
$$\Delta = l/360$$

$$= 13000/360$$

$$= 36.11 \text{ mm}$$

เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดขึ้นในศาลาอเนกประสงค์ คือ 0.35 มิลลิเมตร พบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าการเสียรูปที่จำกัด คือ 36.11 มิลลิเมตร จึงสรุปได้ว่าชิ้นส่วนศาลามีระยะการเสียรูปจากการรับแรงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ คำนวณจากสัดส่วนของค่าความสามารถในการต้านแรง (strength) ต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อชิ้นส่วน (stress) โดยจำกัดหน่วยแรงที่กระทำไว้ที่ค่าความสามารถในการต้านทานแรงอัดของวัสดุ (compressive strength) จากการเทียบกันพบว่าค่าความปลอดภัยมีค่าต่ำสุด (Minimum) อยู่ที่ 2 และมีค่าสูงสุด (Maximum) อยู่ที่ 15



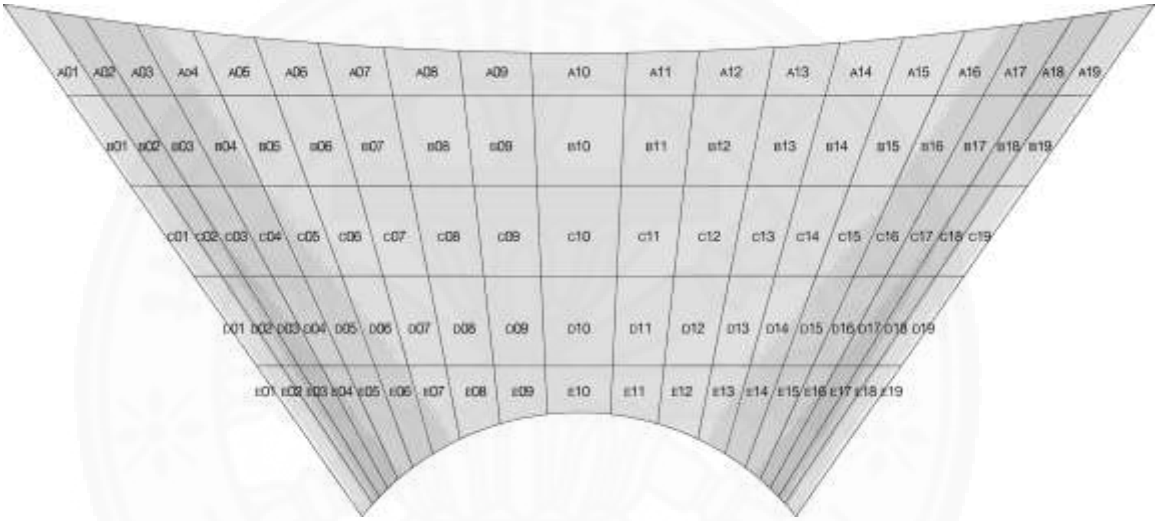
ภาพที่ 5.25 การวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์. โดย ผู้วิจัย, 2559

ผลการวิเคราะห์ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) แสดงให้เห็นว่าชิ้นส่วนแต่ละชิ้นสามารถรับแรงภายนอกที่มากระทำสูงสุดได้ไม่เท่ากัน โดยส่วนที่รับแรงภายนอกได้ต่ำที่สุด คือ ชิ้นส่วนที่แสดงผลเป็นสีเขียว จะรับแรงได้เป็น 2 เท่าจากสภาวะปกติ ในขณะที่ส่วนที่รับแรงภายนอกได้สูงที่สุด คือ ชิ้นส่วนที่แสดงผลเป็นสีน้ำเงิน จะรับแรงได้เป็น 15 เท่าจากสภาวะปกติ

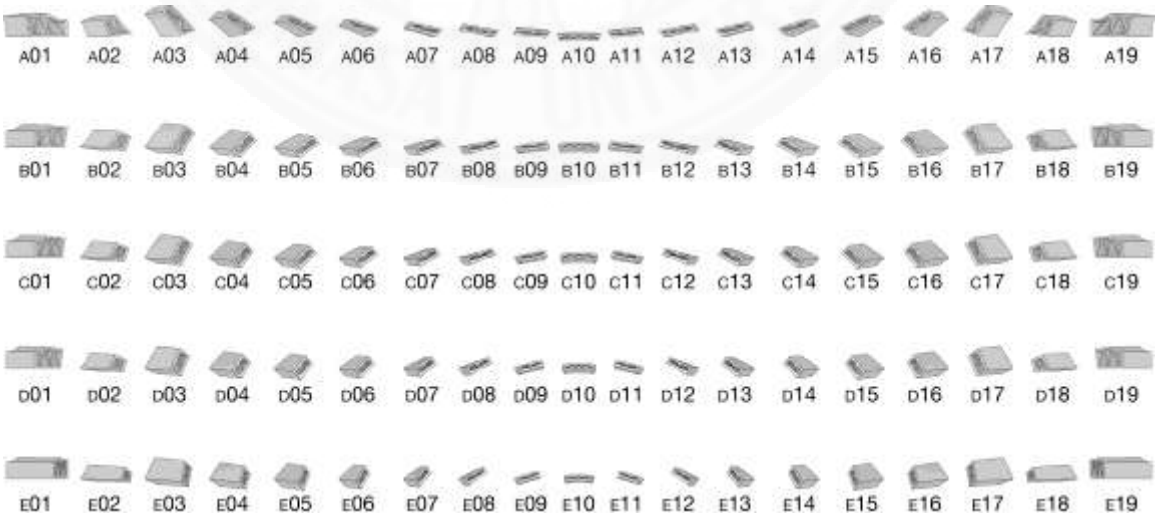
จากการประเมินผลการวิเคราะห์ความเค้น (Stress Analysis) พบว่าค่าความเค้นภายในชิ้นส่วน (Principal Stress) ค่าการเสียรูปจากการรับแรง (Displacement) และค่าความปลอดภัย (Safety Factor) อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมด จึงสรุปผลการวิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้างได้ว่าศาลาอเนกประสงค์มีสามารถในการคงรูปอยู่ได้ด้วยตัวเอง

5.5 การจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

เนื่องจากรูปแบบของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีความแตกต่างกัน การจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติจึงต้องทำเป็นแบบเฉพาะสำหรับแต่ละชิ้น และเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างเป็นระบบ จึงต้องมีการระบุรหัสของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นโดยกำหนดให้แถวบนสุดในแบบเป็นแถว A และเรียงลำดับไล่ลงมาจนถึงแถวล่างสุดเป็นแถว E แล้วกำหนดหมายเลขให้ชิ้นส่วนแต่ละแถวไล่จากซ้ายไปขวาเป็นหมายเลข 01 – 19 ดังนี้

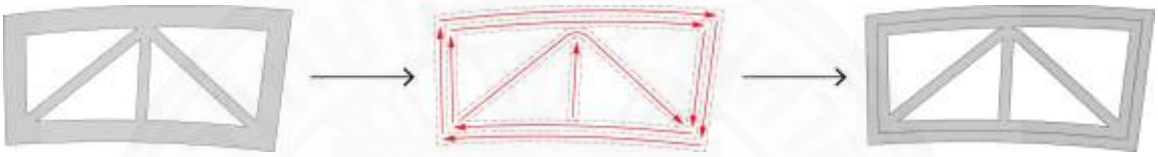


ภาพที่ 5.26 ผังแสดงรหัสและตำแหน่งของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น. โดย ผู้วิจัย, 2559



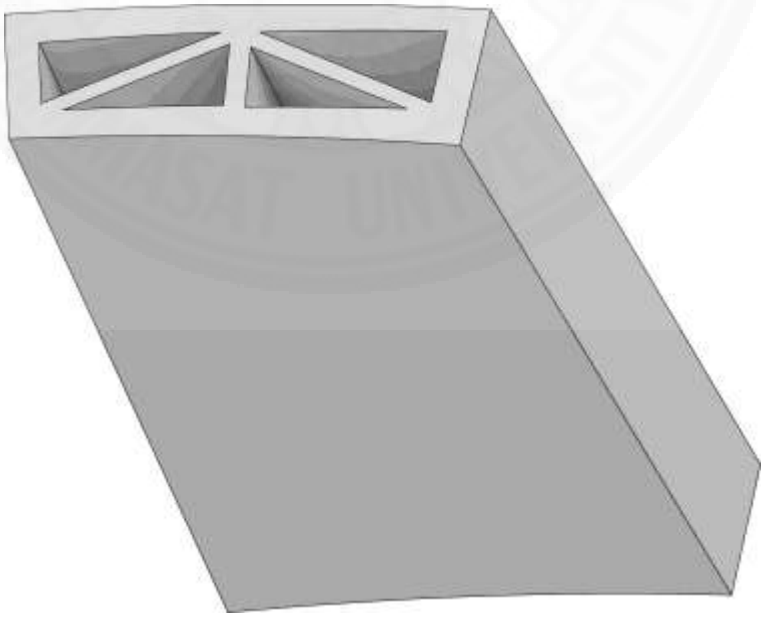
ภาพที่ 5.27 รหัสและลักษณะของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น. โดย ผู้วิจัย, 2559

เมื่อแยกชิ้นส่วนทุกชิ้นแล้วต้องจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติสำหรับชิ้นส่วนแต่ละชิ้น การทำแบบคือการกำหนดเส้นทางการเดินของหัวฉีดวัสดุทั้งในแกน X แกน Y และแกน Z เพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งจะต้องคำนึงถึง 2 ตัวแปรเป็นหลัก ได้แก่ ขนาดของหัวฉีดวัสดุ และระยะความสูงระหว่างชั้นของการตัด contour เนื่องจากตัวแปรทั้ง 2 ตัวจะมีผลต่อการจัดทำแบบหรือการกำหนดเส้นทางเดินของหัวฉีดวัสดุ หัวฉีดที่มีขนาดเล็กและระยะความสูงระหว่างชั้นที่ห่างกันน้อย จะมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดวัสดุมากกว่าและต้องใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปนานกว่าหัวฉีดที่มีขนาดใหญ่และระยะความสูงระหว่างชั้นที่ห่างกันมาก ดังนั้นการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานจึงต้องพิจารณารูปทรงต้นแบบของชิ้นงานแล้วจึงจัดทำแบบตามความเหมาะสม

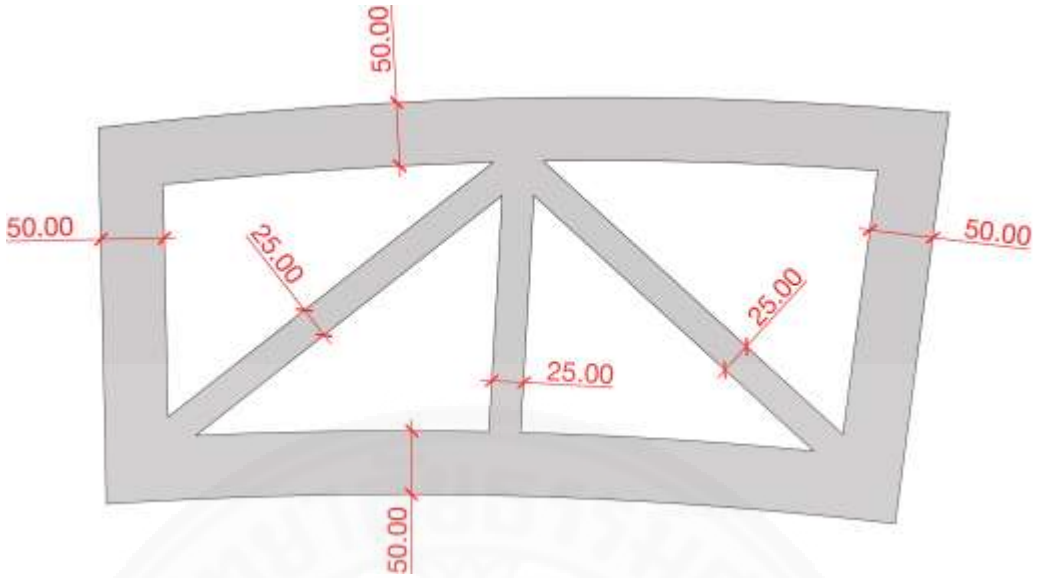


ภาพที่ 5.28 กระบวนการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2559

ผู้วิจัยได้สุ่มเลือกชิ้นส่วนรหัส B16 มาเป็นตัวอย่างเพื่อศึกษาการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูป เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่มีรูปแบบที่ใกล้เคียงกับชิ้นส่วนอื่น ดังนั้นแนวทางในการจัดทำแบบสำหรับชิ้นส่วน B16 จะสามารถใช้ได้กับชิ้นส่วนอื่นได้เช่นกัน ชิ้นส่วนรหัส B16 มีลักษณะดังนี้

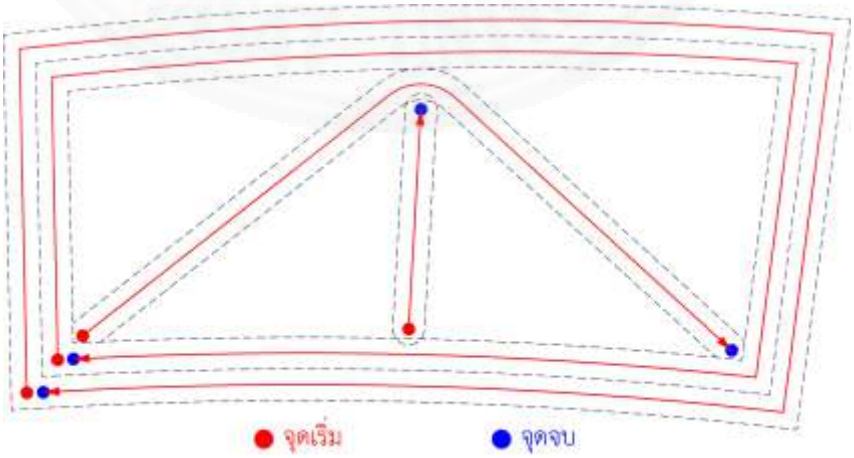


ภาพที่ 5.29 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นส่วนรหัส B16. โดย ผู้วิจัย, 2559

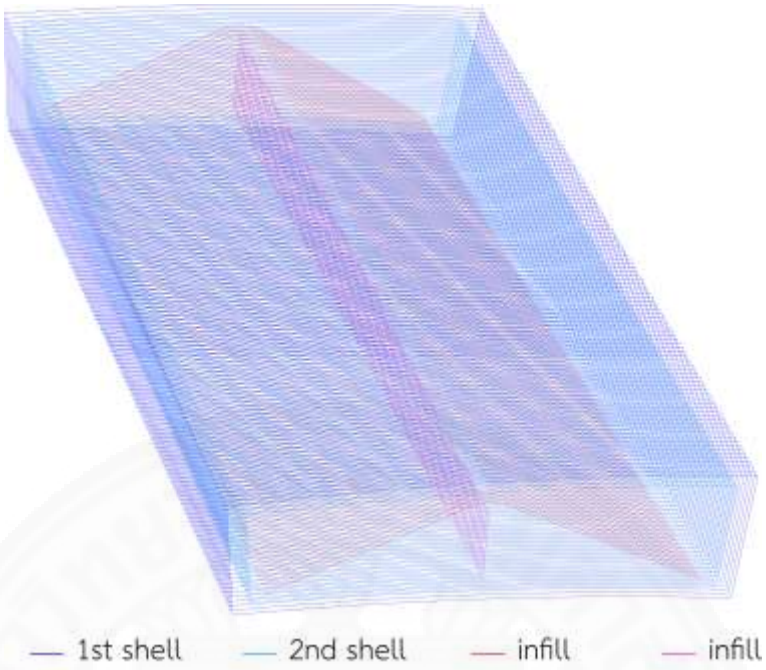


ภาพที่ 5.30 หน้าตัดของชิ้นส่วนรหัส B16. โดย ผู้วิจัย, 2559

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของชิ้นส่วนรหัส B16 แล้วพบว่าส่วนที่เป็นเปลือกของชิ้นงาน (shell) มีความหนาประมาณ 50 มิลลิเมตร และส่วนเติมเต็ม (infill) มีความหนาประมาน 25 มิลลิเมตร โดยจะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันไปตามหน้าตัดส่วนต่าง ๆ ของชิ้นงาน ดังนั้นในการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปจะกำหนดให้ขนาดของหัวฉีดวัสดุมีขนาด 25 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างชั้นสูง 10 มิลลิเมตร จะทำให้ได้แบบที่เป็นเปลือก (shell) หนาชั้นละ 25 มิลลิเมตร 2 ชั้น รวมเป็น 50 มิลลิเมตร และส่วนเติมเต็ม (infill) 1 ชั้น มีความหนา 25 มิลลิเมตร เมื่อกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดวัสดุให้เคลื่อนที่ไปตามจุดกึ่งกลางในแต่ละส่วน จะทำให้ได้เป็นแบบในการขึ้นรูปดังนี้

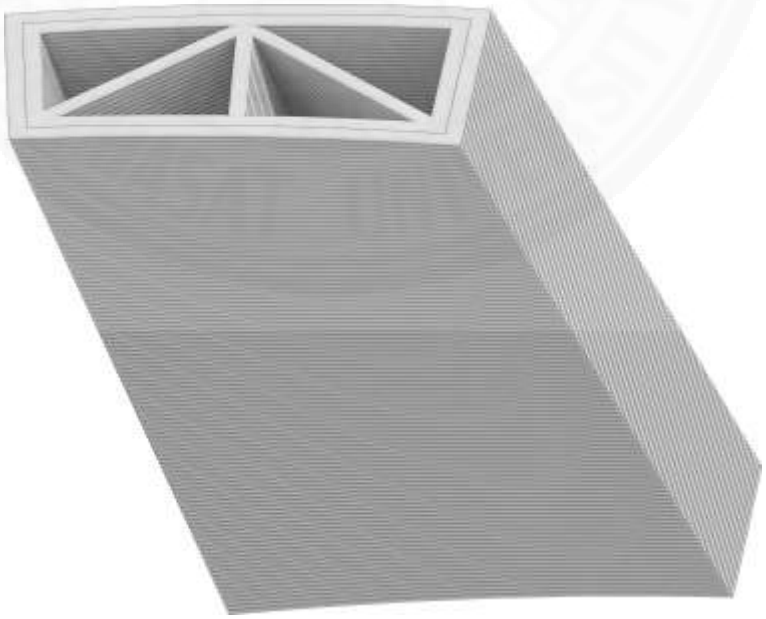


ภาพที่ 5.31 หน้าตัดชิ้นส่วนรหัส B16 และเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวฉีดวัสดุ. โดย ผู้วิจัย, 2559



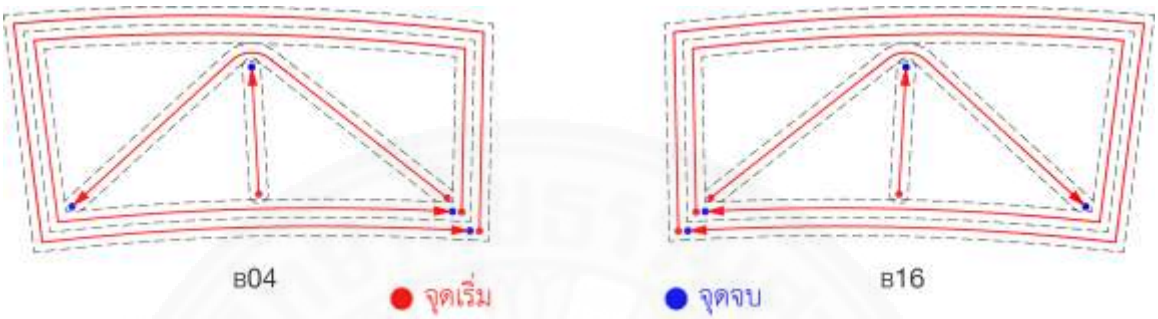
ภาพที่ 5.32 แบบในการขึ้นรูปชิ้นส่วนรหัส B16. โดย ผู้วิจัย, 2559

เมื่อนำแบบไปขึ้นรูปชิ้นส่วนด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์โดยเลือกใช้หัวฉีดวัสดุที่มีขนาด 25 มิลลิเมตร และกำหนดระยะห่างระหว่างชั้นสูง 10 มิลลิเมตร จะได้ชิ้นงานวัสดุซีเมนต์ที่มีลักษณะดังนี้



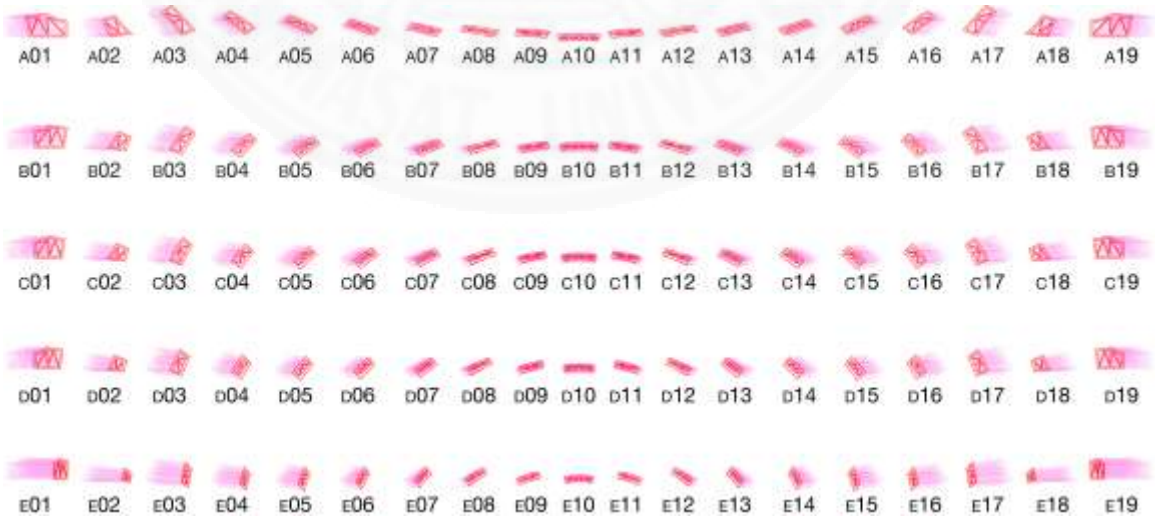
ภาพที่ 5.33 ลักษณะของชิ้นส่วนรหัส B16 ที่ได้จากการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์. โดย ผู้วิจัย, 2559

การจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะต้องแยกทำทีละชิ้น เนื่องจากชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีลักษณะเฉพาะที่ไม่เหมือนกัน แต่ในกรณีที่ชิ้นส่วนมีลักษณะเหมือนกันในแบบภาพสะท้อน (mirror) เช่น ชิ้นส่วนรหัส B04 และ B16 จะสามารถปรับแบบสำหรับขึ้นรูปโดยการสะท้อน (mirror) ให้แบบมีทิศทางตรงกันข้ามกัน แล้วนำมาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งได้เช่นกัน



ภาพที่ 5.34 หน้าตัดชิ้นส่วนรหัส B04 และ B16 ที่เหมือนกันในแบบภาพสะท้อน (mirror) . โดย ผู้วิจัย, 2559

เมื่อนำหลักการข้างต้นมาใช้ในการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติของชิ้นส่วนครบทุกชิ้น ก็จะได้เป็นแบบสำหรับขึ้นรูปที่มีลักษณะเฉพาะที่ไม่เหมือนกันดังภาพที่ 5.35 และเมื่อนำแบบไปขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติจนครบทุกชิ้น ก็จะได้ชิ้นส่วนสำหรับสร้างเป็นศาลาอเนกประสงค์ ซึ่งต้องคำนึงถึงรูปแบบของข้อต่อสำหรับการประกอบชิ้นส่วน และวิธีก่อสร้างให้เป็นศาลาอเนกประสงค์ในลำดับต่อไป

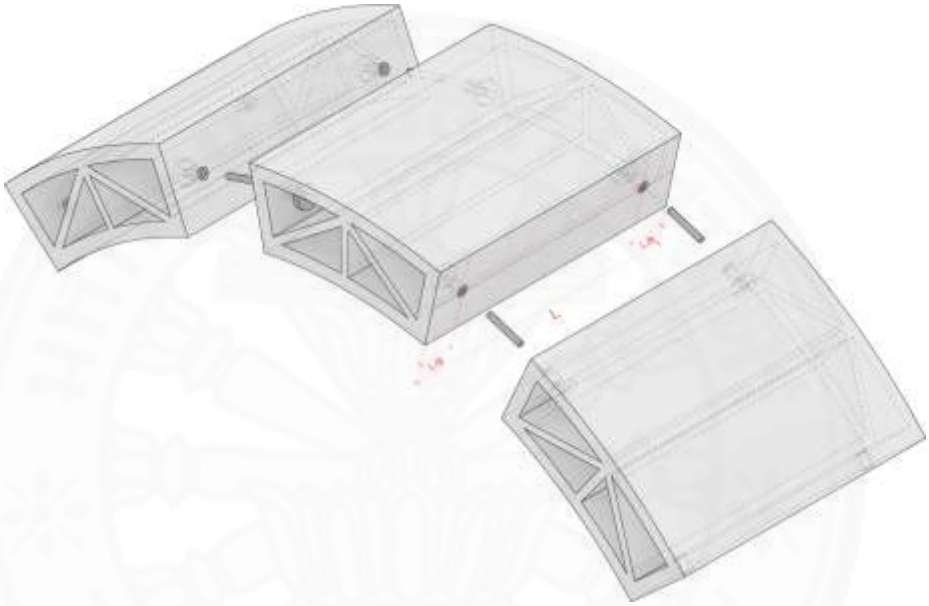


ภาพที่ 5.35 รหัสและแบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นส่วนแต่ละชิ้น. โดย ผู้วิจัย, 2559

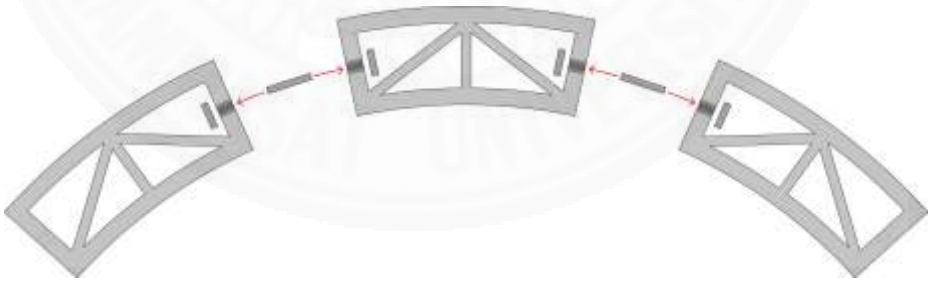
5.6 การศึกษาวิธีการประกอบชิ้นงานและขั้นตอนการก่อสร้าง

5.6.1 การออกแบบข้อต่อสำหรับการประกอบชิ้นส่วน

ข้อต่อของชิ้นส่วนมีหน้าที่ยึดชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเข้าด้วยกันให้ต่อกันในตำแหน่งที่ถูกต้อง เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการประกอบและป้องกันการเคลื่อนที่ออกนอกตำแหน่งที่ถูกต้องของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การออกแบบข้อต่อชิ้นส่วนมีแนวคิดในการออกแบบดังนี้



ภาพที่ 5.36 แนวคิดในการออกแบบข้อต่อของชิ้นส่วน. โดย ผู้วิจัย, 2559



ภาพที่ 5.37 แนวคิดในการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.38 ชิ้นส่วนเมื่อประกอบเข้าด้วยกันแล้ว. โดย ผู้วิจัย, 2559

ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะต้องถูกยึดเข้าหากันด้วยสลักเพื่อให้ชิ้นส่วนต่อกันในตำแหน่งที่ถูกต้อง สลักที่เหมาะสมสำหรับการยึดวัตถุในงานคอนกรีตหรืองานวัสดุซีเมนต์ที่ช่างก่อสร้างนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือพุกโลหะ (anchors bolt) ซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างที่สามารถหาได้ง่าย มีความแข็งแรงทนทาน สามารถยึดเกาะและรับน้ำหนักได้ดี และมีหลากหลายขนาดให้เลือกใช้ โดยผู้วิจัยได้เลือกพุกโลหะ 2 รูปแบบมาศึกษา ซึ่งมีลักษณะดังนี้

1. พุกเหล็ก

ใช้สำหรับงานห้อยหรือแขวนวัสดุต่าง ๆ กับผนังหรือเพดาน เป็นพุกเหล็กปลายผ่าซึ่งจะขยายตัวเมื่อขันสกรู ช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะได้ดี

ภาพที่ 5.39 พุกเหล็ก ขนาด 3/8". โดย ผู้วิจัย, 2559

2. พุกกัลวาไนซ์

เป็นพุกชุบกัลวาไนซ์ ไม่เป็นสนิม เหมาะสำหรับงานกลางแจ้ง ใช้กับงานยึดผนังและพื้นทั่วไปที่มีน้ำหนักมาก เช่น ติดตั้งแอร์ และสามารถใช้กับงานพิเศษที่มีการสั่นไหวได้ เช่น การติดตั้งพัดลมเพดาน

ภาพที่ 5.40 พุกกัลวาไนซ์ ขนาด 3/8". โดย ผู้วิจัย, 2559

จากการศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของพุกทั้ง 2 แบบ พบว่าพุกกัลวาไนซ์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานประกอบชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์มากกว่า เนื่องจากเป็นพุกที่ทำด้วยวัสดุเหล็กซิงค์ไม่เป็นสนิม เหมาะสำหรับงานกลางแจ้ง สามารถรับน้ำหนักได้ดี และยังสามารถรับแรงสั่นไหวได้อีกด้วย เมื่อทำการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะ พบว่าพุกกัลวาไนซ์แต่ละขนาดมีคุณสมบัติในการรับน้ำหนักดังนี้

ตารางที่ 5.5

คุณสมบัติเฉพาะของพุกกัลวาไนซ์แต่ละขนาด

Anchor Size	Anchor Length	Hole Size	Bolt Diameter	2000 psi Concrete Pull-Out
1/4"	1-5/6"	1/2"	1/4"	690 lb. (312.98 kg)
5/16"	1-5/8"	5/8"	5/16"	1120 lb. (508.02 kg)
3/8"	2"	3/4"	3/8"	1325 lb. (601.01 kg)
1/2"	2-5/16"	7/8"	1/2"	2575 lb. (1168.00 kg)
5/8"	2-5/8"	1"	5/8"	4110 lb. (1864.26 kg)
3/4"	3-15/16"	1-1/4"	3/4"	5250 lb. (2381.36 kg)

หมายเหตุ. จาก https://www.confast.com/products/technical-info/double-anchor.aspx, 2016

ผู้วิจัยได้เลือกใช้พุกกัลวาไนซ์ขนาด 3/8" เนื่องจากเป็นขนาดที่มีความยาวเหมาะสมกับความหนาเปลือก (shell) ของชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์มากที่สุด พุกขนาด 3/8" มีความยาว 2" หรือประมาณ 50 มิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับความหนาเปลือก (shell) ของชิ้นส่วนพอดี

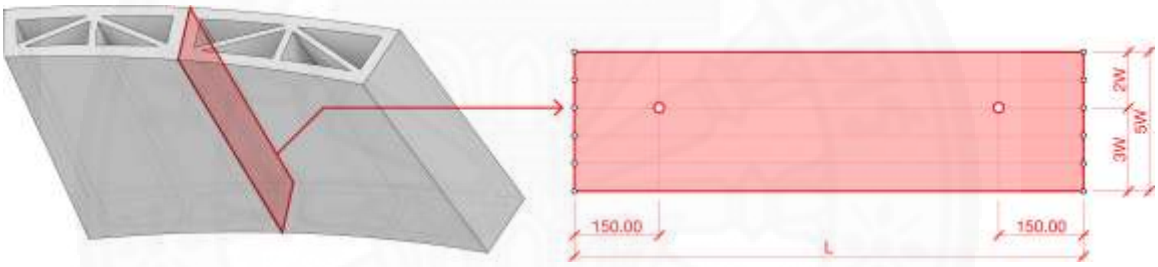
ภาพที่ 5.41 พุกกัลวาไนซ์ ขนาด 3/8". โดย ผู้วิจัย, 2559

5.6.2 การติดตั้งพุกกัลวาไนซ์เพื่อใช้เป็นข้อต่อชิ้นส่วนวัสดุซีเมนต์

การติดตั้งพุกเข้ากับชิ้นส่วนวัสดุซีเมนต์ต้องใช้สว่านในการเจาะชิ้นส่วนให้เป็นรูกลวงเพื่อติดตั้งพุกเข้าไปในชิ้นส่วน โดยต้องใช้ดอกสว่านขนาด 3/8" ในการเจาะ เพื่อให้ได้รูที่มีขนาดพอดีกับตัวพุก การเจาะชิ้นงานและการติดตั้งพุกมีขั้นตอนดังนี้

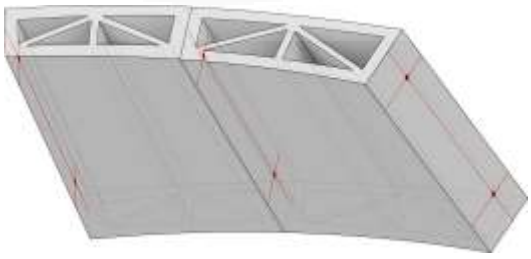
1. ระบุตำแหน่งในการเจาะ

การระบุตำแหน่งในการเจาะรูเพื่อติดตั้งพุกใช้วิธีการหาตำแหน่งได้โดยการระบุพิกัดบนระนาบของชิ้นส่วนด้านที่แต่ละชิ้นมาบรรจบกัน สำหรับชิ้นงานรหัส B16 และ B17 ผู้วิจัยได้ทำการระบุตำแหน่งการเจาะโดยแบ่งระยะความกว้างของด้านที่ชิ้นงานมาบรรจบกันออกเป็น 5 ส่วน และวัดระยะ 150 มิลลิเมตรจากขอบชิ้นงาน แล้วใช้จุดตัดที่เกิดขึ้นเป็นพิกัดในการเจาะรูเพื่อติดตั้งพุก



ภาพที่ 5.42 การหาพิกัดในการเจาะรูเพื่อติดตั้งพุก. โดย ผู้วิจัย, 2559

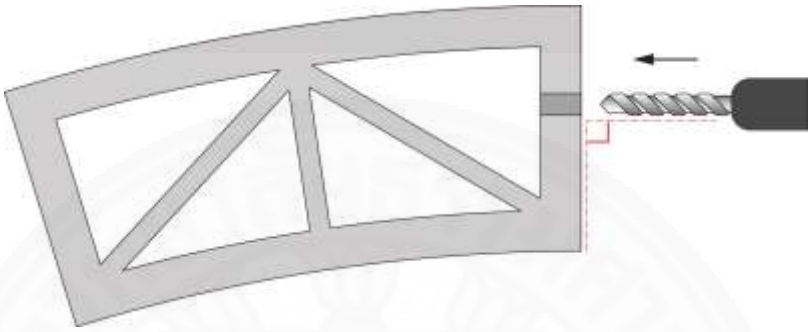
การระบุพิกัดในการเจาะรูลงบนระนาบของชิ้นส่วนด้านที่แต่ละชิ้นมาบรรจบกันจะต้องระบุตำแหน่งเดียวกันอย่างแม่นยำทั้ง 2 ชิ้น เพื่อให้รูที่เกิดขึ้นอยู่ตรงกัน การติดตั้งพุกเพื่อยึดชิ้นส่วนจึงจะมีความเป็นไปได้



ภาพที่ 5.43 ตำแหน่งการเจาะรูที่ได้จากการระบุพิกัด. โดย ผู้วิจัย, 2559

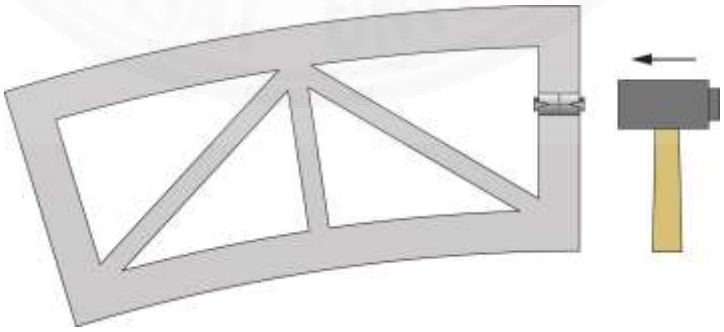
2. การเจาะรูและการติดตั้งพุก

การเจาะรูชิ้นส่วนต้องใช้ดอกสว่านขนาด 3/8" เพื่อให้ได้รูที่มีขนาดพอดีกับพุกกัลวาไนซ์ขนาด 3/8" โดยจะต้องเจาะในตำแหน่งที่ระบุพิกัดไว้อย่างแม่นยำ และต้องเจาะในองศาที่ตั้งฉากกับระนาบที่เจาะเท่านั้น เพื่อให้การยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันมีความเป็นไปได้



ภาพที่ 5.44 การเจาะรูชิ้นงานในองศาที่ตั้งฉากกับระนาบที่เจาะ. โดย ผู้วิจัย, 2559

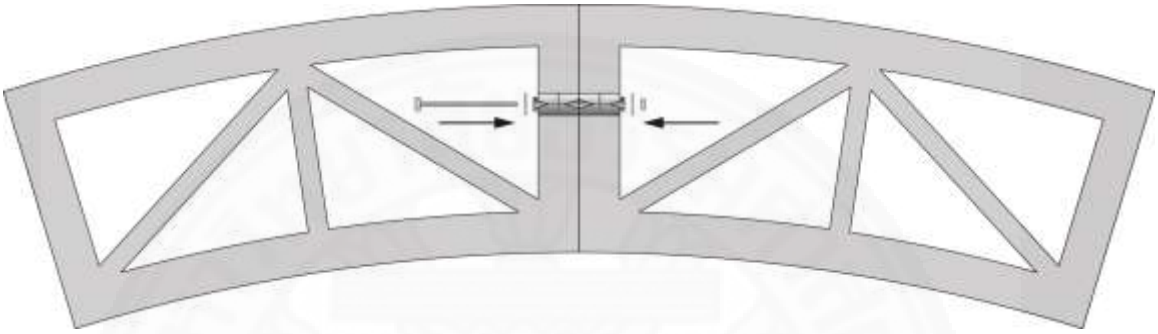
เมื่อเจาะรูขนาด 3/8" ในตำแหน่งที่ถูกต้องแล้วจึงจะสามารถติดตั้งพุกกัลวาไนซ์ได้ การติดตั้งพุกกัลวาไนซ์สามารถทำได้โดยเสียบพุกลงไปในรูที่เจาะไว้ในระดับหนึ่งให้พอที่จะตอกด้วยค้อนได้ จากนั้นจึงใช้ค้อนในการตอกพุกเข้าไปในชิ้นส่วนจนมิด ค้อนที่ใช้ในการตอกจะต้องเป็นค้อนยาง เนื่องจากการตอกพุกจะทำให้เกิดแรงกระแทกในระหว่างการตอกซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน ดังนั้นจึงควรใช้ค้อนยางเพื่อลดแรงกระแทกที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการตอกพุก จะช่วยลดโอกาสการเกิดความเสียหายกับชิ้นงานได้



ภาพที่ 5.45 การติดตั้งพุกกัลวาไนซ์ในชิ้นงาน. โดย ผู้วิจัย, 2559

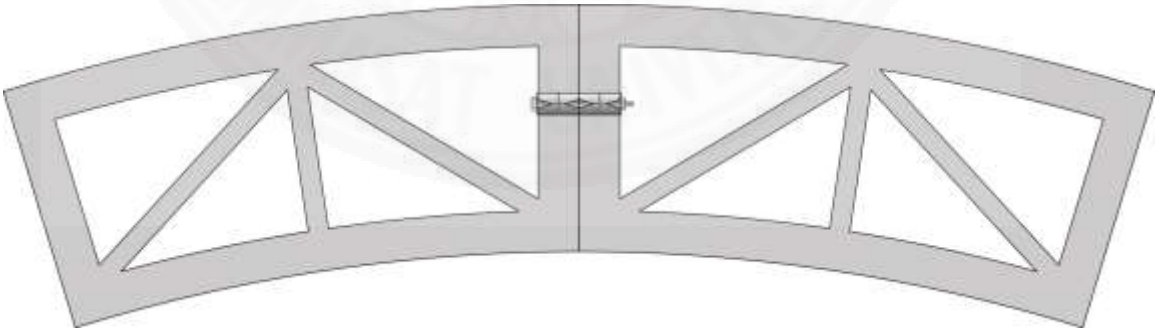
3. การประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน

เมื่อติดตั้งพุกเข้าไปในตำแหน่งที่ระบุไว้ในชิ้นงานแล้วจึงจะสามารถนำชิ้นงานมาประกอบเข้าด้วยกันได้ การประกอบสามารถทำได้โดยนำชิ้นงานมาเรียงต่อกันในตำแหน่งที่ถูกต้อง โดยพุกที่อยู่ในชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นจะต้องชนกันในตำแหน่งที่ถูกต้องพอดี จึงจะสามารถติดตั้งแหวนรองและไขสกรูเพื่อยึดพุกทั้ง 2 ตัวเข้าหากันได้



ภาพที่ 5.46 การไขสกรูเพื่อยึดชิ้นงานเข้าด้วยกัน. โดย ผู้วิจัย, 2559

เมื่อทำการไขสกรูเพื่อยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันครบทั้ง 2 คู่แล้ว ชิ้นส่วนจะยึดติดกันในตำแหน่งที่ถูกต้อง และสามารถคงทนต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อชิ้นส่วนซึ่งอาจทำให้ชิ้นส่วนเคลื่อนออกจากตำแหน่งที่ถูกต้องได้



ภาพที่ 5.47 ชิ้นงานที่ถูกยึดเข้าหากันด้วยพุก. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.48 หุ่นจำลองขนาด 1:5 แสดงรายละเอียดทางโครงสร้างของชิ้นส่วน B16 และ B17. โดย ผู้วิจัย, 2559

ภาพที่ 5.49 หุ่นจำลองขนาด 1:5 แสดงรายละเอียดรอยต่อของชิ้นส่วน B16 และ B17. โดย ผู้วิจัย, 2559

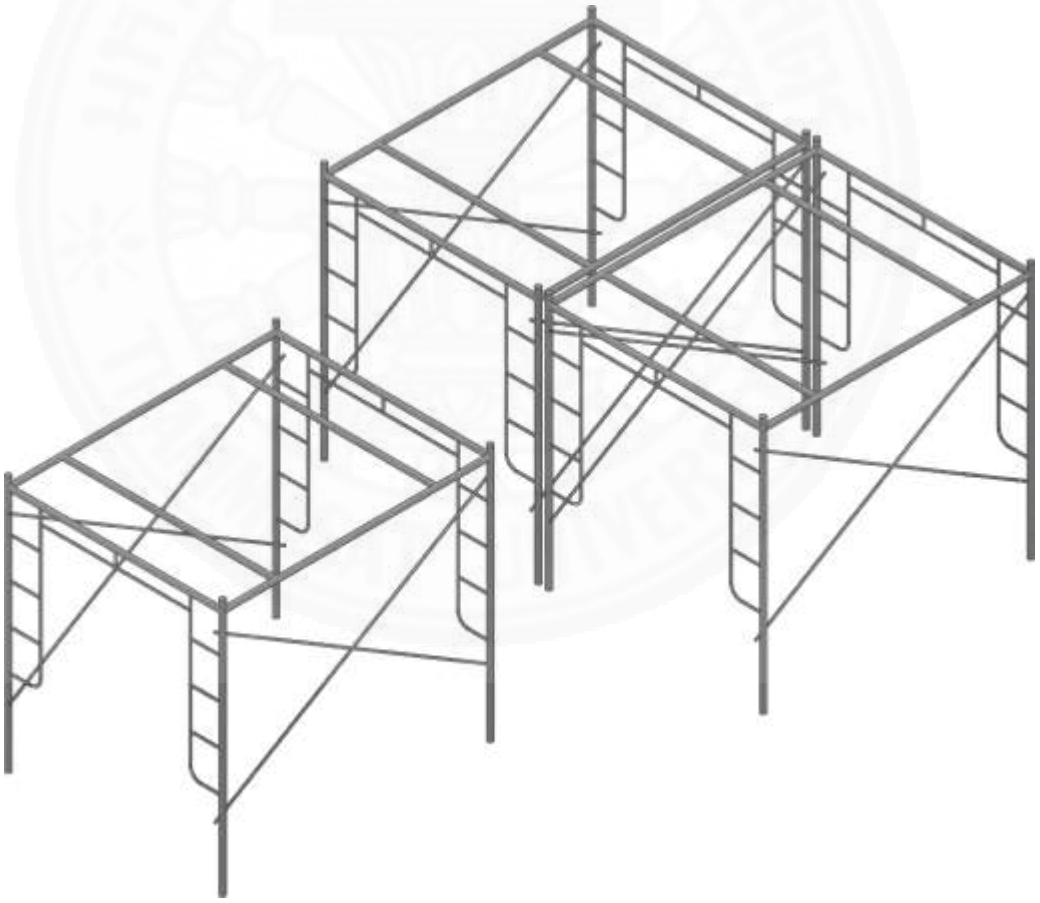
ภาพที่ 5.50 หุ่นจำลองขนาด 1:5 แสดงรายละเอียดรอยต่อของชิ้นส่วน B16 และ B17. โดย ผู้วิจัย, 2559

5.6.3 ขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ในกระบวนการก่อสร้าง

การก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์คือการนำชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติและติดตั้งพุกแล้วมาประกอบกันในพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. การประกอบนั่งร้านเพื่อเตรียมการก่อสร้าง

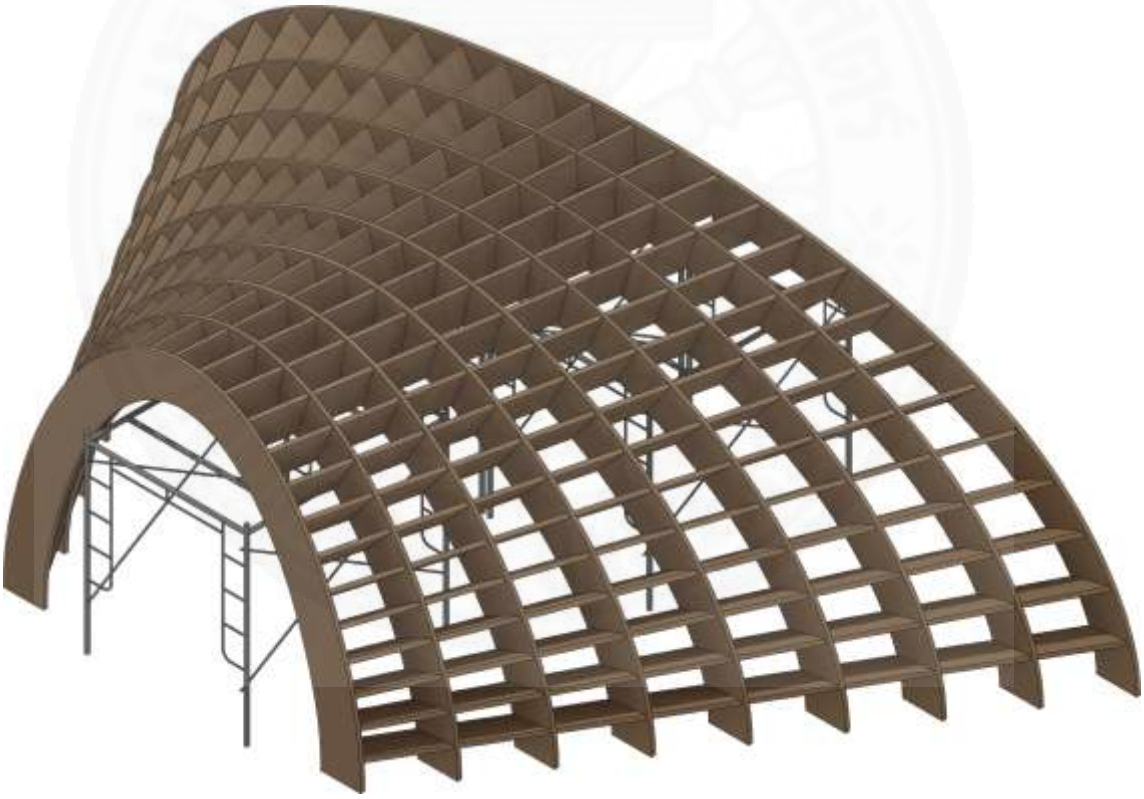
ขั้นตอนแรกของกระบวนการก่อสร้างคือการประกอบนั่งร้านสำหรับใช้ในงานก่อสร้างเพื่อเตรียมความพร้อมในการดำเนินการขั้นต่อไป นั่งร้านจะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างชั่วคราวในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งจะรับน้ำหนักทั้งชิ้นงานที่ถูกขนย้ายมาประกอบและน้ำหนักของช่างก่อสร้างที่ทำหน้าที่ประกอบชิ้นงานด้วย



ภาพที่ 5.51 การประกอบนั่งร้านเพื่อเตรียมการก่อสร้าง. โดย ผู้วิจัย, 2559

2. การสร้างโครงสร้างชั่วคราวเพื่อรองรับชิ้นส่วน

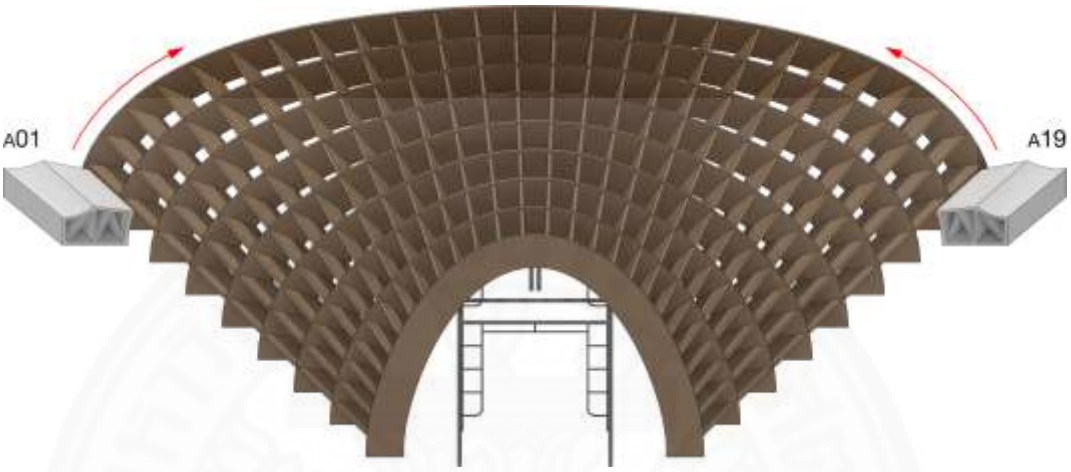
หลังจากประกอบนั่งร้านสำหรับใช้ในงานก่อสร้างแล้ว จะต้องสร้างโครงสร้างชั่วคราวขึ้นมาสำหรับรองรับการประกอบชิ้นงานศาลาอเนกประสงค์โดยเฉพาะ รูปทรงของโครงสร้างชั่วคราวจะเป็นโครงเคร่ารูปทรงเดียวกันกับศาลาอเนกประสงค์และเลือกใช้ไม้เป็นวัสดุในการประกอบโครงสร้างชั่วคราวนี้จะช่วยรับน้ำหนักของชิ้นงานในระหว่างการประกอบ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานเรียงตัวกันอยู่ได้ก่อนที่จะติดตั้งชิ้นงานครบแถวเป็นรูปทรงซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) และสามารถรับน้ำหนักได้ด้วยตัวเอง นอกจากนี้โครงสร้างชั่วคราวยังช่วยให้ช่างก่อสร้างสามารถดำเนินการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์ได้ง่ายขึ้น โดยช่างก่อสร้างจะสามารถขึ้นไปอยู่บนโครงสร้างชั่วคราวและประกอบชิ้นงานแต่ละชิ้นเข้าด้วยกันได้สะดวกขึ้น ช่างสามารถเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนให้มาอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องและทำการไขสกรูเพื่อยึดชิ้นงานเข้าด้วยกันได้อย่างสะดวก



ภาพที่ 5.52 การสร้างโครงสร้างชั่วคราวเพื่อรองรับชิ้นส่วน. โดย ผู้วิจัย, 2559

3. เริ่มเรียงชิ้นส่วนจากส่วนล่างของแต่ละแถว

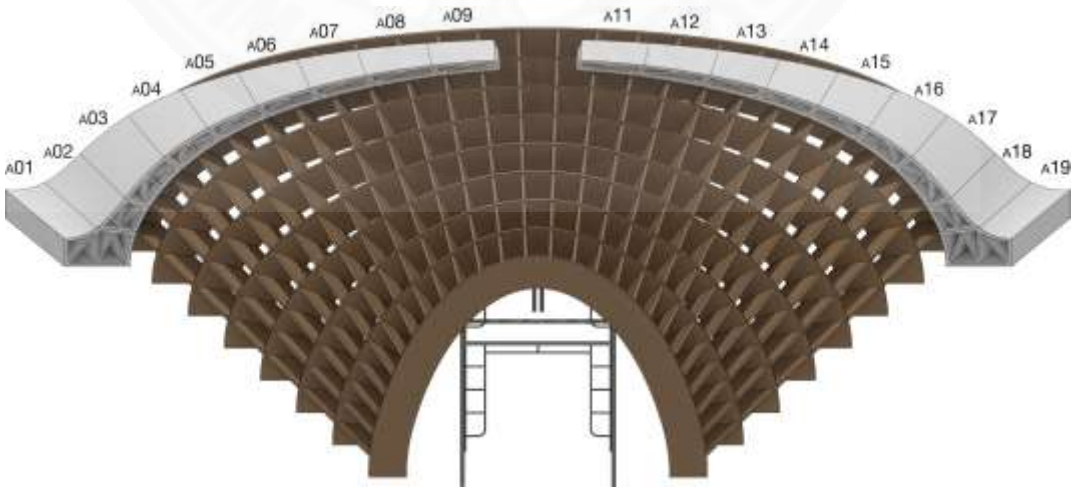
การเรียงชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์จะต้องเรียงไล่ไปทีละแถว โดยเริ่มเรียงจากชิ้นที่อยู่ล่างสุดของแต่ละแถว เช่น แถว A ให้เริ่มเรียงจากชิ้นส่วนรหัส A01 และ A19 ก่อน แล้วจึงเรียงชิ้นถัดไปที่อยู่ด้านบนตามลำดับ



ภาพที่ 5.53 การเริ่มเรียงชิ้นส่วนจากส่วนล่างของแต่ละแถว. โดย ผู้วิจัย, 2559

4. เรียงชิ้นส่วนจากล่างขึ้นบนตามลำดับ

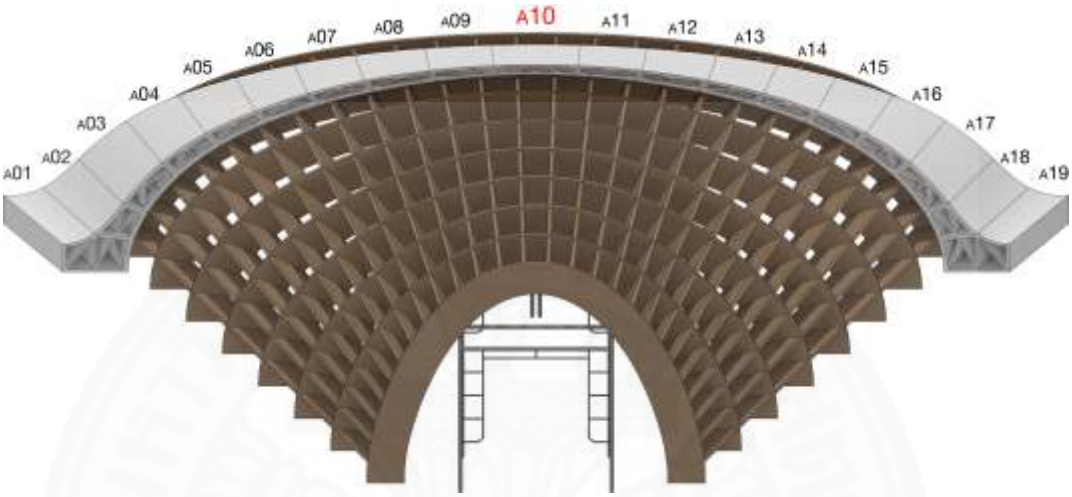
หลังจากวางชิ้นส่วนชิ้นล่างสุดแล้วให้เรียงชิ้นส่วนถัดมาจากล่างขึ้นบนตามลำดับ ฝั่งซ้ายให้วางชิ้นส่วนรหัส A02 ตามด้วย A03 ไปจนถึง A09 และฝั่งขวาให้วางชิ้นส่วนรหัส A18 ตามด้วย A17 ไปจนถึง A11 ตามลำดับ



ภาพที่ 5.54 การเรียงชิ้นส่วนจากล่างขึ้นบนตามลำดับ. โดย ผู้วิจัย, 2559

5. วางชิ้นกลางของแถวเป็นชิ้นสุดท้าย

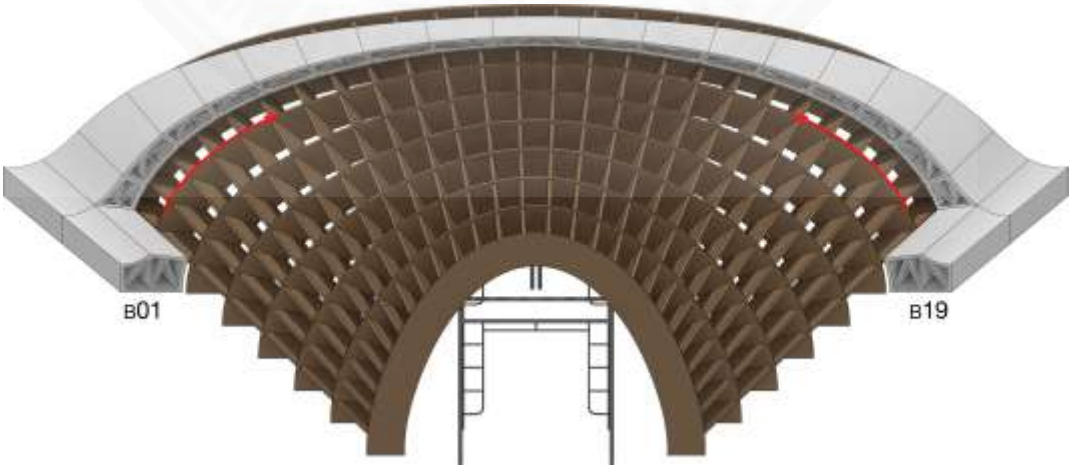
เมื่อเรียงชิ้นส่วนทั้ง 2 ด้านจนครบแล้ว ให้วางชิ้นส่วนรหัส A10 ซึ่งเป็นชิ้นที่อยู่ตรงกลางเป็นชิ้นสุดท้าย เมื่อวางชิ้นส่วน A10 แล้วจะทำให้โครงสร้างของแถว A ประกอบรวมกันโดยสมบูรณ์ ชิ้นส่วนทั้งหมดในแถว A จะเรียงตัวกันและคงรูปอยู่ได้ด้วยตัวเอง



ภาพที่ 5.55 การวางชิ้นกลางของแถวเป็นชิ้นสุดท้าย. โดย ผู้วิจัย, 2559

6. เริ่มเรียงชิ้นส่วนในแถวถัดมา

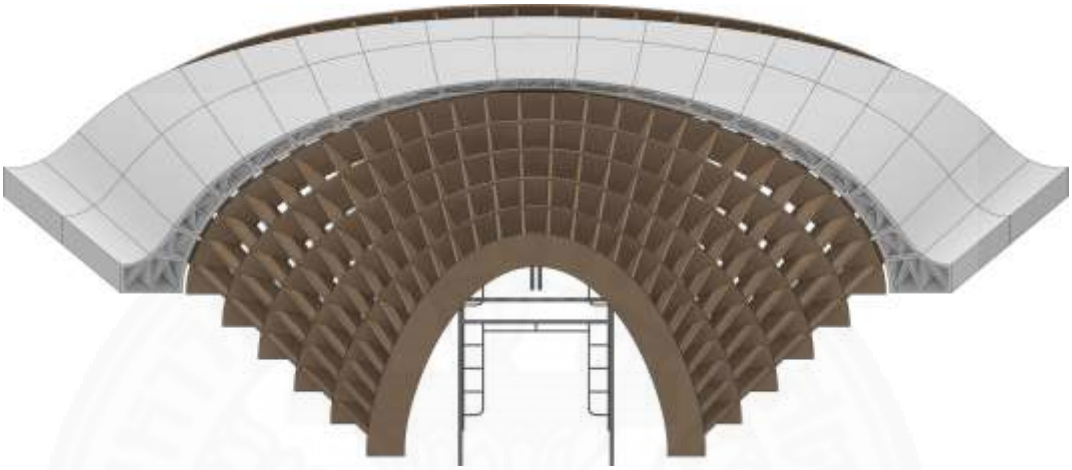
หลังจากที่ประกอบชิ้นส่วนแถว A แล้วให้เริ่มประกอบชิ้นส่วนแถว B ซึ่งอยู่ถัดมาโดยเริ่มจากชิ้นที่อยู่ล่างสุดของแถวเช่นเดียวกับแถว A คือ ด้านซ้ายให้เริ่มวางชิ้นส่วนรหัส B01 และด้านขวาให้เริ่มวางชิ้นส่วนรหัส B19 แล้วจึงเรียงชิ้นถัดไปที่อยู่ด้านบนตามลำดับ



ภาพที่ 5.56 การเริ่มเรียงชิ้นส่วนในแถวถัดมา. โดย ผู้วิจัย, 2559

7. เรียงชิ้นส่วนจากล่างขึ้นบนตามลำดับจนครบทั้งแถว

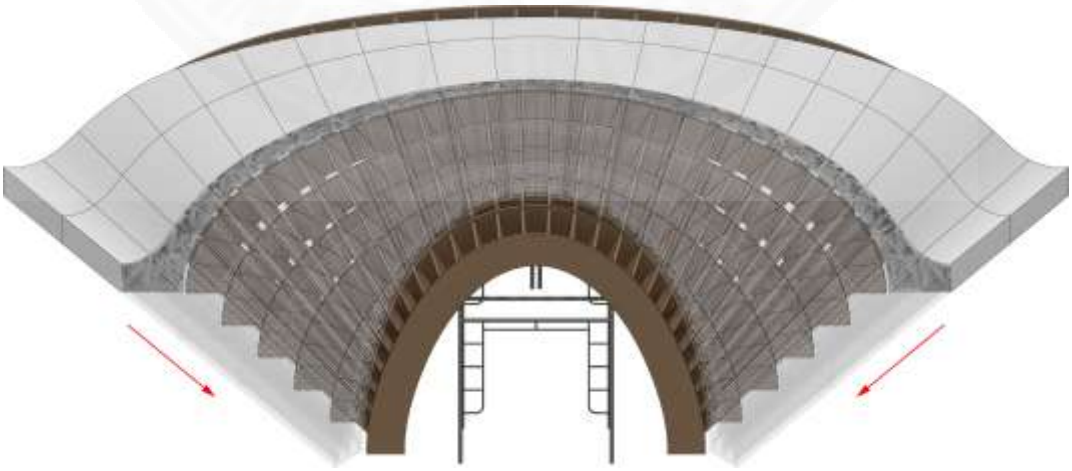
เรียงชิ้นส่วนถัดมาจากล่างขึ้นบนตามลำดับ ฝั่งซ้ายให้วางชิ้นส่วนรหัส B02 ไปจนถึง B09 และฝั่งขวาให้วางชิ้นส่วนรหัส B18 ไปจนถึง B11 ตามลำดับ แล้วจึงวางชิ้นส่วนรหัส B10 ซึ่งอยู่ตรงกลางเป็นชิ้นสุดท้ายเพื่อประกอบโครงสร้างแถว B ให้สมบูรณ์



ภาพที่ 5.57 การเรียงชิ้นส่วนจากล่างขึ้นบนตามลำดับจนครบทั้งแถว. โดย ผู้วิจัย, 2559

8. ประกอบชิ้นงานแถวถัดไปตามกระบวนการเดียวกันกับแถวก่อนหน้า

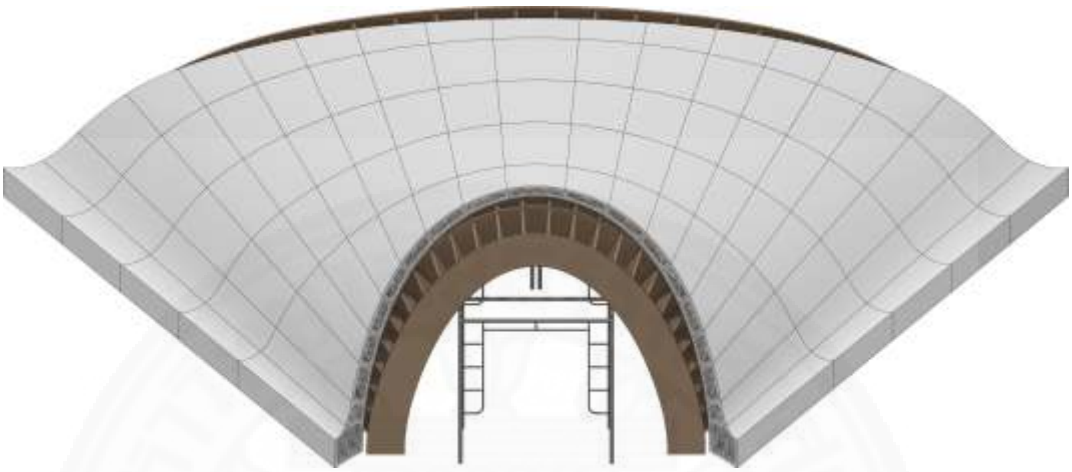
ดำเนินการประกอบชิ้นงานในแถวถัด ๆ ไปทีละแถว โดยให้ประกอบตามกระบวนการในลักษณะเดียวกันกับแถวก่อนหน้า คือการเริ่มวางชิ้นล่างสุดของแต่ละแถว แล้วจึงเรียงชิ้นส่วนจากล่างขึ้นบนตามลำดับจนครบทั้งแถว



ภาพที่ 5.58 การประกอบชิ้นงานแถวถัดไปตามกระบวนการเดียวกันกับแถวก่อนหน้า. โดย ผู้วิจัย, 2559

9. ประกอบชิ้นงานให้ครบทุกแถว

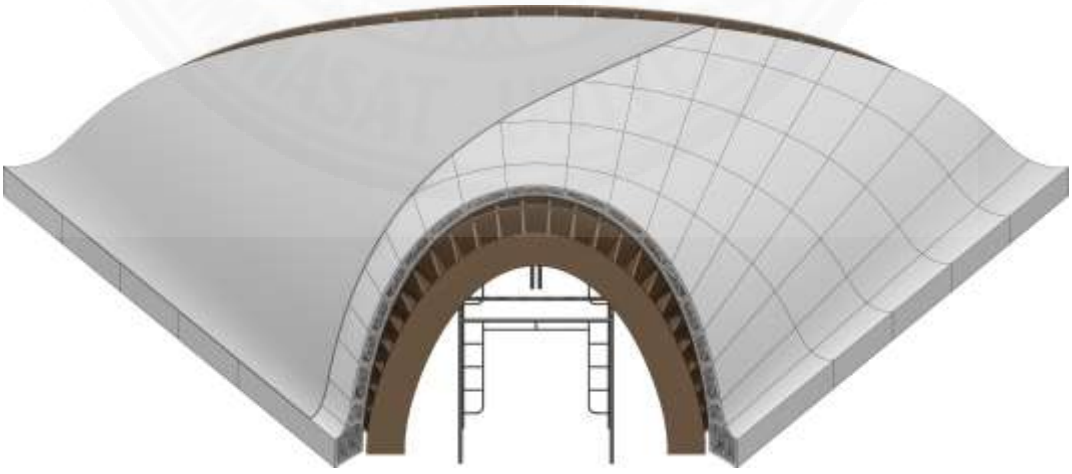
ดำเนินการประกอบชิ้นงานส่วนที่เหลือตามกระบวนการให้เสร็จสิ้นจนครบสมบูรณ์เป็นศาลาอเนกประสงค์



ภาพที่ 5.59 การประกอบชิ้นงานให้ครบทุกแถว. โดย ผู้วิจัย, 2559

10.ฉาบปูนทับส่วนผิวนอกของศาลาเพื่อปิดรอยต่อ

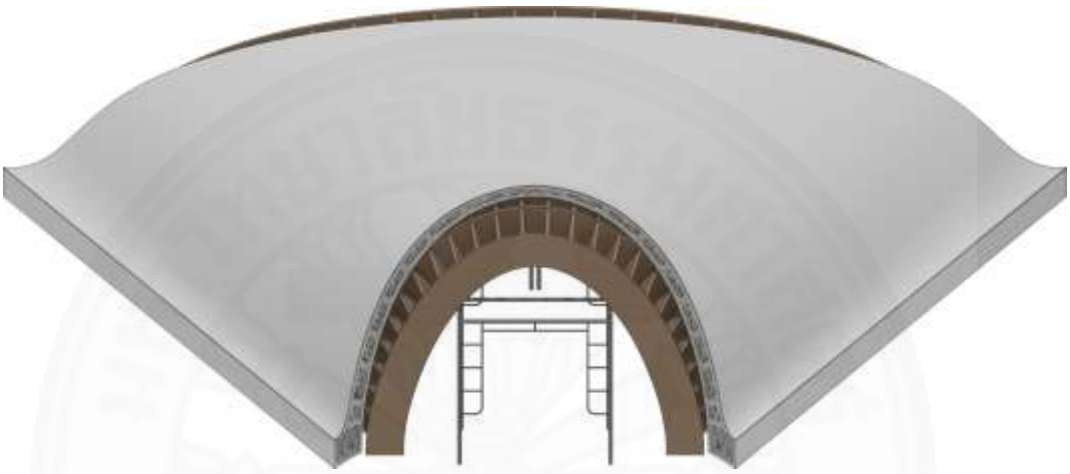
ฉาบปูนปิดผิวนอกของศาลาอเนกประสงค์เพื่อเป็นการปกปิดรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนแต่ละชิ้น โดยจะต้องฉาบไม่ให้เนื้อซีเมนต์หนาเกินกว่า 1 – 2 เซนติเมตร เพื่อให้โครงสร้างของตัวศาลารับน้ำหนักของผิวซีเมนต์น้อยที่สุด



ภาพที่ 5.60 การฉาบปูนทับส่วนผิวนอกของศาลาเพื่อปิดรอยต่อ. โดย ผู้วิจัย, 2559

11.ทำระบบกันซึมให้กับผิวซีเมนต์ที่ฉาบปิดรอยต่อของชิ้นส่วน

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วซึมของน้ำฝน การฉาบผิวซีเมนต์ปิดรอยต่อจึงต้องทำระบบกันซึมด้วย โดยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใช้สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำใส่เนื้อซีเมนต์ในขณะที่กำลังผสมปูนเพื่อให้เนื้อปูนมีมีปริมาณน้ำในส่วนผสมน้อยลง แต่ยังคงมีความเหลวทำให้สามารถทำงานได้ง่าย เมื่อปูนแห้งจะทำให้ได้ผิวซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นมากพอที่จะป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้ หรืออาจใช้สีทาภายนอกประเภทสีอะครีลิคทาปิดผิวของศาลาเพิ่มเติม เพื่อป้องกันการรั่วซึมอีกขั้นหนึ่ง



ภาพที่ 5.61 การทำระบบกันซึมให้กับผิวซีเมนต์ที่ฉาบปิดรอยต่อของชิ้นส่วน. โดย ผู้วิจัย, 2559

12.รื้อถอนโครงสร้างชั่วคราวออก

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์ทั้งหมดแล้ว จึงจะสามารถดำเนินการรื้อถอนโครงสร้างชั่วคราวออก และดำเนินการก่อสร้างในส่วนอื่นได้

ภาพที่ 5.62 การรื้อถอนโครงสร้างชั่วคราวออก. โดย ผู้วิจัย, 2559

5.7 การประเมินผลการออกแบบและความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง

5.7.1 การประเมินผลการออกแบบศาลาอเนกประสงค์

จากการศึกษาการออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง สามารถประเมินผลการออกแบบสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งเพื่อใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการก่อสร้างได้ดังนี้

1. ด้านการออกแบบรูปทรง

การออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งภายใต้ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ คือ การขึ้นรูปชิ้นงานในขนาดที่จำกัด ข้อจำกัดทางด้านความซับซ้อนของรูปทรงที่เครื่องพิมพ์สามมิติสามารถขึ้นรูปได้ และคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์ที่สามารถรับแรงอัดได้ดีแต่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ ผู้วิจัยจึงได้เลือกรูปทรงเปลือกโค้ง (shell) ที่สามารถออกแบบให้เกิดการถ่ายเทแรงอัดภายในรูปทรงได้ทั้งหมด มาใช้ในการออกแบบรูปทรงของศาลาอเนกประสงค์ โดยมีแนวทางในการออกแบบคือให้ศาลาเป็นรูปทรงซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) แล้วทอนรูปทรงออกเป็นชิ้นส่วนย่อย เพื่อให้ชิ้นส่วนมีการถ่ายเทแรงภายในรูปทรงและคงรูปอยู่ได้ด้วยตัวเอง

ด้วยข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ที่มีการจำกัดขนาดชิ้นงานขึ้นรูป ทำให้ต้องมีการทอนรูปทรงออกเป็นชิ้นส่วนย่อยจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในกระบวนการก่อสร้างมากขึ้น เนื่องจากต้องคำนึงถึงวิธีการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน และการประกอบชิ้นส่วนจำนวนมากเข้าด้วยกันย่อมมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนในระหว่างการประกอบได้มากกว่าการประกอบชิ้นส่วนจำนวนน้อย

นอกจากนี้การเลือกใช้รูปทรงเปลือกโค้ง (shell) ในการออกแบบศาลาอเนกประสงค์จะทำให้มีข้อจำกัดในการออกแบบช่องเปิด เนื่องจากรูปแบบของรูปทรงเปลือกโค้งที่จะต้องมีการออกแบบให้รูปทรงของเปลือกมีความสมบูรณ์ เพื่อให้รูปทรงมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทแรงได้ดี การสร้างช่องเปิดจะทำให้รูปทรงมีความสมบูรณ์น้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทแรงภายในรูปทรงลดลงไปด้วย

2. ด้านการใช้งานในเชิงสถาปัตยกรรม

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มีศักยภาพในการนำมาใช้ในการก่อสร้างสถาปัตยกรรม ด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานและสามารถรับน้ำหนักได้ดี จึงมีความเป็นไปได้ที่จะรองรับวัตถุที่มีน้ำหนักมาก เช่น โคมไฟ พัดลมเพดาน เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ศาลา

อเนกประสงค์จึงสามารถรองรับการปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้งานได้ เช่น การปรับเปลี่ยนให้เป็นพื้นที่ทำหรับทำกิจกรรมในเวลากลางคืนโดยการแขวนโคมไฟไว้กับโครงสร้างของศาลาเพื่อให้แสงสว่าง หรือการสร้างเป็นพื้นที่ปิดแล้วแขวนเครื่องปรับอากาศไว้กับโครงสร้างของศาลา เป็นต้น

การนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มาใช้ในการก่อสร้างยังคงต้องคำนึงถึงการอุดรอยต่อระหว่างชิ้นส่วน เนื่องจากอาจเกิดปัญหาจากการรั่วซึมของน้ำฝน ซึ่งจะส่งผลเสียต่อการใช้งานภายใน และอาจเกิดผลเสียต่อโครงสร้างในระยะยาว ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการฉาบปูนทับตัวศาลาเพื่อปกปิดรอยต่อ และทำให้ตัวศาลามีความสามารถในการกันการรั่วซึมของน้ำฝนได้

5.7.2 การประเมินความเป็นไปได้ในการก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์

1. ความรวดเร็วในการก่อสร้าง

เมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานศาลาอเนกประสงค์ระหว่างการใช้เทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูปและการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ จะพบว่าเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติสามารถลดขั้นตอนและจำนวนคนในการทำงานได้ โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ 5.6

เปรียบเทียบขั้นตอนขึ้นรูประหว่างการหล่อขึ้นรูปและการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

การหล่อขึ้นรูป	การพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์
1. การขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ ขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่งเพื่อใช้ในการทำแม่พิมพ์ โดยใช้ฝีมือมนุษย์	1. การจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปสามมิติ แปลงรูปทรงต้นแบบให้เป็นเส้นทางการเดินของหัวฉีดวัสดุในเครื่องพิมพ์สามมิติโดยฝีมือมนุษย์
2. การทำแม่พิมพ์ ทำแม่พิมพ์ด้วยซีลิโคน โดยใช้ฝีมือมนุษย์	2. การประเมินทางวิศวกรรม ประเมินความแข็งแรงชิ้นงานด้วยคอมพิวเตอร์
3. การหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน เทซีเมนต์ลงในแม่พิมพ์เพื่อหล่อขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ฝีมือมนุษย์	3. การแปลงแบบเป็น G-code แปลงแบบสำหรับขึ้นรูปสามมิติให้เป็นคำสั่งเพื่อสั่งการเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยคอมพิวเตอร์
4. การแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โดยใช้ฝีมือมนุษย์	4. ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ การสั่งการเครื่องพิมพ์สามมิติให้ขึ้นรูปชิ้นงานสั่งการด้วยฝีมือมนุษย์ ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูปและการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มีขั้นตอนและกระบวนการที่แตกต่างกัน จากการเปรียบเทียบพบว่าการหล่อขึ้นรูปต้องดำเนินการโดยใช้ฝีมือมนุษย์ทั้งหมดทุกขั้นตอน ในขณะที่การพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์จะมีกระบวนการทำงานที่ต้องใช้ฝีมือมนุษย์เพียงแค่การจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปสามมิติและการสั่งการเครื่องพิมพ์สามมิติให้ขึ้นรูปชิ้นงานเท่านั้น ขั้นตอนอื่นจะเป็นการดำเนินการโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นหลัก ซึ่งจะใช้เวลาในการดำเนินการน้อยกว่ากระบวนการที่ต้องใช้ฝีมือมนุษย์ทั้งสิ้น นอกจากนี้การดำเนินการด้วยคอมพิวเตอร์ยังมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดน้อย จึงมีโอกาสที่จะต้องเสียเวลาจากแก้ไขงานน้อยกว่า

2. คุณภาพงานก่อสร้าง

จากการเปรียบเทียบขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานระหว่างการใช้เทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูปและการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในตารางที่ 5.2 พบว่าการหล่อขึ้นรูปเป็นการดำเนินการโดยใช้ฝีมือมนุษย์ทั้งหมดทุกขั้นตอน ในขณะที่การพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เป็นการดำเนินการโดยใช้ทั้งฝีมือมนุษย์และคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความแม่นยำและเชื่อถือได้มากกว่าการดำเนินการด้วยฝีมือมนุษย์เพียงอย่างเดียว จึงมีความเป็นไปได้ที่จะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพมากกว่า

3. ต้นทุนในการก่อสร้าง

เมื่อเปรียบเทียบราคาการขึ้นรูปชิ้นงานระหว่างการใช้เทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูปและการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ พบว่ามีราคาที่แตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ 5.7

เปรียบเทียบราคาการขึ้นรูประหว่างการหล่อขึ้นรูปและการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

การหล่อขึ้นรูป				การพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์			
กระบวนการ	จำนวน	/หน่วย	รวมราคา	กระบวนการ	จำนวน	/หน่วย	รวมราคา
ขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ	1,000	95 ชิ้น	95,000	ทำแบบขึ้นรูปสามมิติ	95 ชิ้น	2,000	190,000
ทำแม่พิมพ์	9,000	95 ชิ้น	855,000	ประเมินทางวิศวกรรม	95 ชิ้น		
หล่อขึ้นรูปชิ้นงาน	200	95 ชิ้น	19,000	แปลงเป็น G-code	95 ชิ้น	-	800,000
ค่าวัสดุซีเมนต์	20 คิว	1,800	36,000	พิมพ์ชิ้นงาน	95 ชิ้น		
ราคาสุทธิ		1,005,000		ราคาสุทธิ		990,000	

หมายเหตุ. ราคานี้เป็นการประเมินโดยช่างฝีมือและผู้ประเมินราคาค่าพิมพ์สามมิติจาก SCG ปี 2559

การใช้เทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูปในการขึ้นรูปชิ้นงานศาลาอเนกประสงค์ จะมีราคาสูงกว่าการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เล็กน้อย ส่วนที่ทำให้ค่าใช้จ่ายในของการหล่อขึ้นรูปสูงกว่าการใช้การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์คือการทำแม่พิมพ์ด้วยซีลีโคน ที่มีราคาสูงถึง 855,000 บาท คิดเป็นสัดส่วนกว่า 85% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการหล่อขึ้นรูป ในขณะที่การพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มีค่าใช้จ่ายในการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติค่อนข้างสูง คือ 190,000 บาท ถ้าหากสถาปนิกหรือผู้ออกแบบชิ้นงานมีความเข้าใจในหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติเป็นอย่างดี และสามารถจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติได้ด้วยตัวเอง จะทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ลดลงไปได้มาก ต้นทุนในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติก็จะยิ่งถูกลงด้วย

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย

การทดลองนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มาใช้ในงานสถาปัตยกรรม ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีการออกแบบรูปทรงเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง และได้ศึกษาหลักการทำงานและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วย เพื่อนำมาใช้ในการคลี่คลายแบบสำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ด้วยเทคโนโลยีดังกล่าว ทั้งนี้ได้มีการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงโครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และได้ออกแบบข้อต่อและวิธีการประกอบชิ้นงานเพื่อลดข้อบกพร่องของงานก่อสร้าง รวมถึงการศึกษาความเป็นไปได้ในการก่อสร้างและการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงการลงทุน โดยผลการวิจัยจะเป็นการแสดงสถานภาพที่เป็นข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีในช่วงเวลาที่ทำการวิจัย และนำเสนอแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

ผู้วิจัยได้นำผลลัพธ์จากการศึกษาการออกแบบและการก่อสร้างมาวิเคราะห์เบื้องต้น เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อสรุปของงานวิจัย โดยสามารถแบ่งเป็นประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

6.1 ข้อสรุปจากการวิจัย

1. เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มีศักยภาพในการนำมาใช้ในงานก่อสร้างสถาปัตยกรรมได้ ด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานและสามารถรับน้ำหนักได้ดี และสามารถแก้ไขปัญหาและข้อจำกัดในการก่อสร้างงานสถาปัตยกรรมคอนกรีตรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งได้ ทั้งในประเด็นเรื่องความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากฝีมือมนุษย์ การพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มีความแม่นยำในการขึ้นรูปชิ้นงานสูง การออกแบบข้อต่อให้สามารถประกอบชิ้นงานได้อย่างแม่นยำจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากฝีมือมนุษย์ได้ ในเรื่องระยะเวลาก่อสร้างที่ยาวนานอันเป็นผลมาจากข้อจำกัดของวัสดุและกระบวนการก่อสร้างที่มีหลายขั้นตอน เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติขั้นตอนการทำงานที่น้อยกว่าและใช้ระยะเวลาในการทำงานที่สั้นกว่า ทำให้ระยะเวลาก่อสร้างสั้นลงได้ นอกจากนี้การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ยังสร้างขยะในกระบวนการก่อสร้างน้อยกว่าการหล่อขึ้นรูปอย่างมาก ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะได้อย่างมาก และด้วยกระบวนการทำงานที่ใช้เครื่องจักรเป็นหลัก จะทำให้สามารถชดเชยต้นทุนส่วนค่าแรงในการก่อสร้างที่มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นได้

2. การออกแบบศาลาอเนกประสงค์รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งภายใต้ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ คือ การขึ้นรูปชิ้นงานในขนาดที่จำกัด ข้อจำกัดทางด้านความซับซ้อนของรูปทรงที่เครื่องพิมพ์สามมิติสามารถขึ้นรูปได้ และคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์ที่สามารถรับแรงอัดได้ดีแต่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ การเลือกรูปทรงเปลือกโค้ง (shell) ที่สามารถออกแบบให้เกิดการถ่ายเทแรงอัดภายในรูปทรงของศาลาอเนกประสงค์จึงมีความเหมาะสม โดยมีแนวทางในการออกแบบคือให้ศาลาเป็นรูปทรงซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) เพื่อให้ชิ้นส่วนมีการถ่ายเทแรงอัดและคงรูปอยู่ได้ด้วยตัวเอง

ด้วยข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ที่มีการจำกัดขนาดชิ้นงานขึ้นรูป ทำให้ต้องมีการทอนรูปทรงออกเป็นชิ้นส่วนย่อยจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในกระบวนการก่อสร้างมากขึ้น เนื่องจากต้องคำนึงถึงวิธีการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน และการประกอบชิ้นส่วนจำนวนมากเข้าด้วยกันย่อมมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนในระหว่างการประกอบได้มากกว่าการประกอบชิ้นส่วนจำนวนน้อย แต่ข้อจำกัดนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถลดจำนวนการทอนชิ้นส่วนที่จะทำให้เกิดโอกาสในการคลาดเคลื่อนของการประกอบชิ้นงานลงได้

จากการศึกษาการออกแบบสามารถสรุปได้ว่าการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มาใช้ในการก่อสร้างสถาปัตยกรรม สถาปนิกหรือผู้ออกแบบจะต้องมีความรู้และความเข้าใจหลักการของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติตั้งแต่ต้น โดยเฉพาะข้อจำกัดของเทคโนโลยี จึงจะสามารถมองภาพรวมของแนวทางในการออกแบบได้ และสามารถออกแบบสถาปัตยกรรมในรูปแบบที่มีความเหมาะสมกับการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการก่อสร้างได้

3. การเลือกใช้รูปทรงเปลือกโค้ง (shell) ให้เกิดการถ่ายเทแรงอัดภายในรูปทรงของศาลาอเนกประสงค์มีความเหมาะสม การออกแบบให้ศาลาเป็นรูปทรงซุ้มประตูช่องโค้ง (arch) แล้วทอนรูปทรงออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ทำให้ชิ้นส่วนของศาลาสามารถคงรูปอยู่ได้ด้วยตัวเอง แต่การใช้รูปทรงเปลือกโค้ง (shell) จะทำให้มีข้อจำกัดในการออกแบบช่องเปิด เนื่องจากรูปแบบของรูปทรงเปลือกโค้งที่จะต้องมีการออกแบบให้รูปทรงของเปลือกมีความสมบูรณ์ เพื่อให้รูปทรงมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทแรงได้ดี การสร้างช่องเปิดอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทแรงภายในรูปทรงลดลง

4. การก่อสร้างศาลาอเนกประสงค์จะต้องดำเนินการอย่างเป็นลำดับขั้นตอนตามที่กำหนดไว้ จึงจะมีความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังต้องอาศัยความถูกต้องแม่นยำในการประกอบเป็นอย่างมาก ทั้งในเรื่องการติดตั้งพุกสำหรับยึดชิ้นงาน การวางชิ้นงานในตำแหน่งที่ถูกต้อง และการฉาบปูนเพื่ออุดรอยต่อและปิดผิวชิ้นส่วนศาลาอเนกประสงค์ จึงจะทำให้ได้งานที่เรียบร้อยและมีคุณภาพ

5. ต้นทุนการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในการขึ้นรูปชิ้นส่วนของศาลาอเนกประสงค์ มีความใกล้เคียงกับการใช้เทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูปมาก ส่วนที่ทำให้ค่าใช้จ่ายในของการหล่อขึ้นรูปสูงกว่าการใช้การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์คือการทำแม่พิมพ์ด้วยซีลีโคน ที่มีราคาสูงถึง 855,000 บาท คิดเป็นสัดส่วนกว่า 85% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการหล่อขึ้นรูป ในขณะที่การพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มีค่าใช้จ่ายในการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติค่อนข้างสูง คือ 190,000 บาท ถ้าหากสถาปนิกหรือผู้ออกแบบชิ้นงานมีความเข้าใจในหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติเป็นอย่างดี และสามารถจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติได้ด้วยตัวเอง จะทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ลดลงไปได้มาก ต้นทุนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการพิมพ์สามมิติก็จะถูกลง

6.2 สรุปข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

ตารางที่ 6.1

ข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. เครื่องพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างแม่นยำ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรายละเอียดถูกต้องตามต้นแบบ 2. เครื่องพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่ใช่รูปทรงตันได้ สามารถลดมวลและน้ำหนักของชิ้นงานให้เหลือเท่าที่จำเป็นได้ ทำให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) ลดลง 3. ไม่จำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นงาน เป็นการลดขยะจากการใช้แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูป 4. ลดขั้นตอนการทำงานที่ต้องใช้แรงงานมนุษย์ ทำให้ใช้แรงงานในกระบวนการผลิตน้อยลง	1. ความซับซ้อนของรูปทรงที่เครื่องพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สามารถขึ้นรูปได้ยังมีข้อจำกัด 2. ขนาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจะถูกจำกัดอยู่ภายใต้ขนาดของเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ 3. ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ และยังต้องมีการประเมินความเป็นไปได้เชิงโครงสร้างของชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป 4. ต้นทุนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในปัจจุบันยังมีราคาสูง จึงทำให้ผู้บริโภคทั่วไปสามารถเข้าถึงได้ยาก

หมายเหตุ. โดย ผู้วิจัย, 2559

รายการอ้างอิง

Book

M.G. Salvadori. (1963). Structure in Architecture: The Building of Buildings. New Jersey: Prentice-Hall Inc.

Article

J. Glymph, D. Shelden, C. Ceccato, J. Mussel. (2004). A Parametric Strategy for Freeform Glass Structures Using Quadrilateral Planar Facet. Santa Monica, California: Gehry Partners, LLP.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

Ciaglia, J. M. (2014). California Skateparks. Retrieved from http://www.californiaskateparks.com

CNN. (2013, January 12). CNN's The Next List: Neri Oxman's experiment with 3D printing buildings. Retrieved from http://www.3ders.org/articles/20130112-cnn-the-next-list-neri-oxman-experiment-with-3d-printing-buildings.html

Concrete Fastening Systems Inc. (2016, May 30). Concrete Double Expansion Anchor. Retrieved from https://www.confast.com/products/technical-info/double-anchor.aspx

Contour Crafting. (2015, December 3). Contour Crafting Robotic Construction System. Retrieved from http://www.contourcrafting.org/

Domus (2015). 3D Concrete Printing. Retrieved from http://www.domusweb.it/content/domusweb/en/news/2014/12/01/_3d_concrete_printing.html

Domus (2015). Vulcan. Retrieved from http://www.domusweb.it/content/domusweb/en/news/2015/10/10/laboratory_for_creative_design_vulcan.html

Elizabeth, O. (2015). How 3D Printing is Changing Architecture: Learning from the Sagrada Familia Team in Barcelona. Retrieved from https://i.materialise.com/blog/how-3d-printing-is-changing-architecture-learning-from-the-sagrada-familia-team-in-barcelona

Freeform Construction. (2015, December 3). 3D Concrete Printing: an innovative construction process. Retrieved from http://www.freeformconstruction.com/

Grunewald, S. J. (2016). Thai Company SCG Develops Custom 3D Printable Cement for 3D Printing Houses and Structures. Retrieved from https://3dprint.com/131560/scg-3d-printable-cement/

Gupapai. (2015). เทศกาลเที่ยวเมืองไทย ปี 2559 ครั้งที่ 36 (13-17 ม.ค.59). Retrieved from http://gupapai.com/?p=5712

Hart, K. (2011). Green Home. Retrieved from http://www.greenhomebuilding.com

Krassenstein, B. (2015, June 30). World's First 3D Printed Office Building, Complete With 3D Printed Furniture & Interior To Be Built in Dubai. Retrieved from http://3dprint.com/77550/dubai-3d-printed-office/

Krassenstein, E. (2015). You Can Now See the First Ever 3D Printer - Invented by Chuck Hull - In the National Inventors Hall of Fame. Retrieved from. Retrieved from http://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/

Langford, G. (2012). Shotcrete and Underground. Retrieved from http://www.novocon.co.nz/shotcrete.html

Maloney, D. (2013). Knowles Industrial Services. Retrieved from http://www.knowlesindustrial.com

Millsaps, B. B. (2015). Silky Concrete Project: Massive Concrete Installation Built by KUKA Robot & Ten 3D Printers. Retrieved from https://3dprint.com/80490/silky-concrete-project/

Monolite UK Ltd. (2012, February 24). D-Shape, a brand created by Monolite UK Ltd. Retrieved from http://www.d-shape.com/index.htm

Neju. (2015). เดินชมงาน “เทศกาลเที่ยวเมืองไทย 2559” ที่สวนลุมพินี. Retrieved from http://www.pantip.com/topic/34673475

Palmer, B. (2015). Concrete Molds. Retrieved from http://www.concretenetwork.com/concrete-molds

Paramaguru, K. (2013). The 3D-Printed House?! A Dutch Architect and Mathematician Break the Mold. Retrieved from. http://newsfeed.time.com/2013/01/27/the-3d-printed-house-a-dutch-architect-and-mathematician-break-the-mold/

Rael, R. (2015). Drum. Retrieved from http://www.emergingobjects.com/project/drum/

Ruijssenaars, J. (2015). Landscape House. Retrieved from http://www.universearchitecture.com/landscapehouse/xoskt5thlwpeykzn3f9f1v3ufew1il

Stott, R. (2015). LCD's VULCAN Awarded Guinness World Record for Largest 3D Printed Structure. Retrieved from http://www.archdaily.com/776169/lcds-vulcan-awarded-guinness-world-record-for-largest-3d-printed-structure

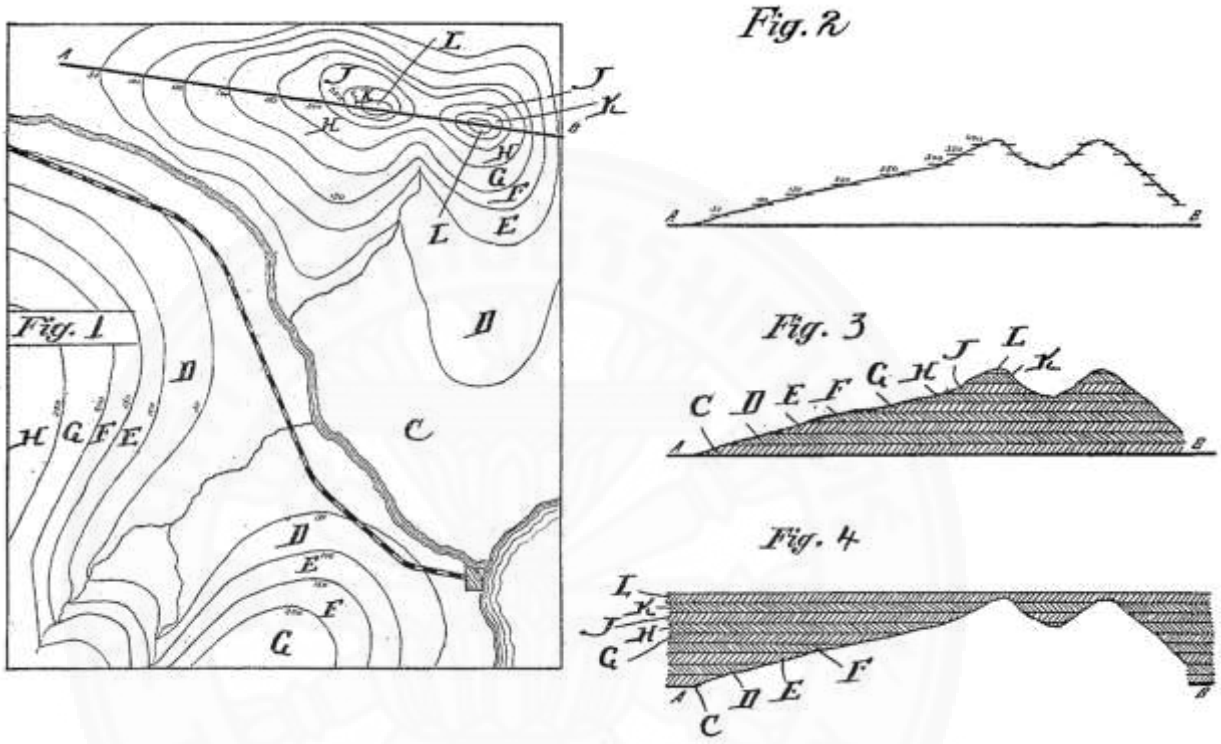
Tuba, C. (2007). *An Appraisal of Curvilinear form in Architecture with an Emphasis on Structure Behavior,* Case Study on Channel Tunnel Railway Terminal at Waterloo, Master of Science in Building Science in Architecture. Middle East Technical University. Retrieved from http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12608161/index.pdf

Wikipedia. (2015, December 7). D-Shape. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/D-Shape

ภาคผนวก

ที่มาของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ถูกคิดค้นและพัฒนามาจากแนวคิดของ Joseph E. Blanther ในปี ค.ศ. 1892 ที่พยามยามสร้างแผนที่แสดงลักษณะภูมิประเทศโดยการแบ่งระดับความสูง-ต่ำของพื้นที่ในระยะห่างเท่า ๆ กัน เกิดเป็นเส้น contour ที่สามารถแสดงลักษณะภูมิประเทศและใช้ในการสร้างแบบจำลองของภูมิประเทศได้

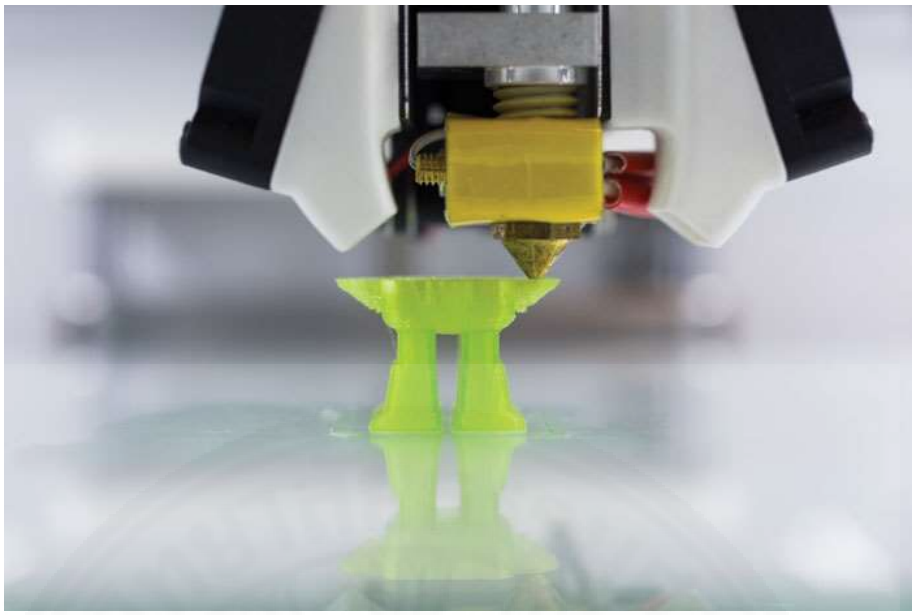


ภาพที่ ผ.1 ภาพแสดงแนวคิดในการสร้างเส้น contour ของ Joseph E. Blanther. จาก http://www.google.com/patents/US473901, 2013

ในปี ค.ศ. 1972 เริ่มมีการคิดค้นวัสดุที่สามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการขึ้นรูปต้นแบบเร็ว (rapid prototyping) โดยนาย Mastubara แห่ง Mitsbushi motors ได้นำเสนอของเหลวประเภท เรซิ่นที่เรียกว่า photopolymer สำหรับใช้ในการขึ้นรูป หลังจากนั้นก็ได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการขึ้นรูปต้นแบบเร็วโดยนักวิจัยจากองค์กรต่าง ๆ และในปี ค.ศ. 1984 นาย Charles W. Hull (ผู้ก่อตั้ง 3D systems) ได้คิดค้นระบบการพิมพ์สามมิติแบบ Stereolithography (SLA) ได้สำเร็จ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการขึ้นรูปต้นแบบเร็วโดยการพิมพ์ชิ้นงานเป็นชั้น layer โดยใช้กระบวนการ photopolymerization

ภาพที่ ผ.2 เครื่องพิมพ์สามมิติแบบ stereolithography ต้นแบบของเครื่องพิมพ์สามมิติ. จาก http://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/06/sla1g.jpg, 2015

หลังจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นวิธีการพิมพ์สามมิติด้วยเทคนิคใหม่ ๆ ขึ้น โดยในปี ค.ศ. 1991 บริษัท Stratasys ได้สร้างเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM (Fused Deposition Modelling) ขึ้นเครื่องแรกของโลก ซึ่งเป็นการขึ้นรูปโดยการฉีดพลาสติกเป็นชั้น layer บนแท่นพิมพ์ และในปี ค.ศ. 1992 บริษัท DTM สามารถสร้างเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ SLS (Selective Laser Sintering) ได้สำเร็จ การทำงานของระบบนี้มีความคล้ายกับระบบ SLA แต่จะใช้ผงแป้งและเลเซอร์แทนของเหลว การขึ้นรูปชิ้นงานจะเป็นการใช้ยิงแสงเลเซอร์ในพิกัดที่มีความละเอียดสูงใส่ผงแป้ง เพื่อให้จับตัวเป็นชิ้นงานทีละชั้น เมื่อทำการยิงแสงเลเซอร์ครบทุกชั้น จะได้ชิ้นงานขึ้นรูปที่มีความละเอียดสูงที่เป็นวัสดุเดียวกันกับผงแป้ง



ภาพที่ ผ.3 การพิมพ์สามมิติระบบ FDM (Fused Deposition Modelling) . จาก http://enablingthefuture.org/wp-content/uploads/2015/02/printing-in-progress.jpg, 2015

ภาพที่ ผ.4 การพิมพ์สามมิติระบบ SLS (Selective Laser Sintering). จาก http://www.kul3d.com/wp-content/uploads/2014/08/diamond-chair-1.jpg, 2014

ในปี ค.ศ. 2001 ได้มีการนำเครื่องพิมพ์สามมิติมาใช้ทำงานสถาปัตยกรรมเป็นครั้งแรก โดยกลุ่มสถาปนิกที่พยายามสานต่องาน Sagrada Familia ของ Antony Gaudi ให้สำเร็จ ซึ่งเครื่องพิมพ์สามมิติได้ถูกนำมาใช้เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ สำหรับประกอบการตัดสินใจของสถาปนิกในกระบวนการออกแบบ เป็นการใช้เทคโนโลยีมาทดแทนการทำงานด้วยฝีมือมนุษย์ ซึ่งมนุษย์ต้องใช้ระยะเวลาในการทำงานที่นานกว่ามากและใช้งบประมาณในการทำงานที่สูง ในขณะที่เครื่องพิมพ์สามมิติสามารถทำงานได้เร็วกว่ามากและใช้ต้นทุนในการทำงานที่ต่ำกว่า

ภาพที่ ผ.5 ชิ้นงานต้นแบบของ Sagrada Familia ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ. จาก https://i.materialise.com/blog/wp-content/uploads/2015/03/print2.jpg, 2015

ภาพที่ ผ.6 ห้องทำงานของสถาปนิกใน Sagrada Familia. จาก http://www.3dprinter-collection.com/Images/news/TALLER MODELISTES 003lo_thumb.jpg, 2015

หลังจากที่เครื่องพิมพ์สามมิติถูกนำมาใช้ในงาน Sagrada Familia ทำให้ผู้คนในวงการอุตสาหกรรมก่อสร้างได้เล็งเห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ จึงมีการพยายามพัฒนาเทคโนโลยีให้สามารถพิมพ์งานสถาปัตยกรรมขนาดเท่าจริงได้ โดยมีการจัดตั้งศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติเพื่อการทำงานสถาปัตยกรรมขึ้นหลายแห่งทั้งในอังกฤษ อเมริกา และจีน ในปี ค.ศ. 2006 นาย Enrico Dini ได้สร้างเครื่องพิมพ์สามมิติขนาดใหญ่ เรียกว่า D-Shape ซึ่งสามารถขึ้นรูปชิ้นงานโดยการเชื่อมผงทรายเข้ากับน้ำทะเลอนินทรีย์และสารยึดเกาะประเภทแม็กนีเซียม เพื่อสร้างชิ้นงานที่เป็นวัสดุคล้ายหิน เป็นการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่เป็นครั้งแรก

ภาพที่ ผ.7 ชิ้นงานต้นแบบที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ D-Shape ในโรงงาน. จาก http://inhabitat.com/files/2010/03/printer3.jpg, 2010

ในปี ค.ศ. 2007 ทีมนักวิจัยด้านวิศวกรรมจาก School of Civil and Building Engineering แห่ง Loughborough University จากประเทศอังกฤษ ได้ริเริ่มโครงการ Freeform Construction เพื่อศึกษาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในห้องทดลอง โดยทำงานร่วมกับทีมสถาปนิกจาก Foster+Partners โดยมีจุดประสงค์การพัฒนาเพื่อการก้าวข้ามขีดจำกัดเรื่องกระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมที่มีความซับซ้อนทางด้านรูปทรง การพัฒนามุ่งเน้นการศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานซีเมนต์รูปทรงต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนแตกต่างกัน การพัฒนาเทคโนโลยีของ Freeform Construction เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ระบบ FDM มาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานหลากหลายรูปทรง ผลจากการศึกษาทำให้กระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงอิสระเปลี่ยนแปลงไป การขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ในการหล่อขึ้นรูป จึงสามารถลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นในกระบวนการก่อสร้างได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดระยะเวลาและขั้นตอนการทำงานในกระบวนการก่อสร้างได้ด้วย

ภาพที่ ผ.8 ทีมพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ระบบ FDM ของ Freeform Construction. จาก http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkes/Downloads/Freeform_construction_LB.jpg, 2015

ภาพที่ ผ.9 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ FDM ของ Freeform Construction. จาก https://static-secure.guim.co.uk/sys-images/Guardian/Pix/pictures/2011/10/25/1319550165980/Freefrom-construction-008.jpg, 2015

ภาพที่ ผ.10 ตัวอย่างชิ้นงานขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ FDM ของ Freeform Construction. จาก http://static.dezeen.com/uploads/2014/11/3D-printed-concrete-by-Foster-and-Partners_dezeen_468_1.jpg, 2015

ในปี ค.ศ. 2010 นาย Behrokh Khoshnevis จาก Viterbi School of Engineering แห่ง University of Southern California สหรัฐอเมริกา ได้ศึกษาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สำหรับใช้ในการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ และสามารถคิดค้นระบบการพิมพ์สามมิติที่สามารถสร้างบ้านทั้งหลังได้ภายใน 1 วันได้สำเร็จ

ภาพที่ ผ.11 แนวคิดการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ ระบบ FDM ในการสร้างอาคารขนาดใหญ่. จาก http://www.craft-usc.com/wp-content/uploads/2014/07/New-Model-CC.png, 2015

ภาพที่ ผ.12 การทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ Contour Crafting. จาก http://www.mapeng.net/Files/Remoteupfile/2012-8/23/01-concrete-rapid-prototyping-contour-crafting-wall-structure.jpg, 2015

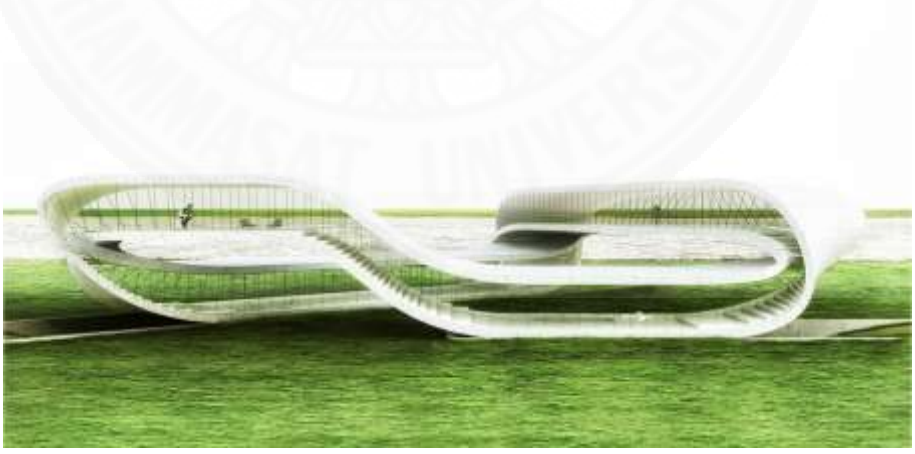
ในปี ค.ศ. 2012 เป็นปีที่เริ่มมีการตื่นตัวในการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมาใช้จริงมากขึ้น Ronald Rael และ Virginia San Fratello อาจารย์มหาวิทยาลัยจาก University of California, Berkeley ได้ก่อตั้งบริษัท Emerging Objects ขึ้น หลังจากที่ได้เริ่มศึกษาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในมหาวิทยาลัย โดยมีจุดประสงค์เพื่อการใช้ในงานสถาปัตยกรรมและการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่เป็นองค์ประกอบของอาคารด้วยวัสดุหลากหลายประเภทและหลากหลายขนาด และเพื่อการก้าวข้ามขีดจำกัดเรื่องการก่อสร้างสถาปัตยกรรมที่มีความซับซ้อนทางด้านรูปทรง

ภาพที่ ผ.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ SLS ของ Emerging Objects. จาก http://www.emergingobjects.com/wp-content/uploads/2011/12/SeatSlug1_LR1.jpg, 2013

ภาพที่ ผ.14 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ SLS ของ Emerging Objects. จาก http://www.emergingobjects.com/projects/pantheon/, 2013

ภาพที่ ผ.15 ตัวอย่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ระบบ SLS ของ Emerging Objects. จาก http://www.emergingobjects.com/wp-content/uploads/2013/01/drum1.jpg, 2013

และในปีเดียวกัน กลุ่มสถาปนิกชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อ Universe Architecture ได้ออกแบบบ้าน Landscape House ซึ่งเป็นบ้านที่มีรูปทรงซับซ้อนและมีความท้าทายในด้านการก่อสร้าง สถาปนิกจึงได้เริ่มศึกษาระบบการพิมพ์สามมิติเพื่อนำมาใช้ในการสร้างบ้านหลังนี้



ภาพที่ ผ.16 Landscape House ออกแบบโดยกลุ่มสถาปนิก Universe Architecture. จาก http://www.universearchitecture.com/landscapehouse, 2013

นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 2012 บริษัท WINSUN ซึ่งเป็นบริษัทรับเหมาก่อสร้างจากประเทศจีน ได้สร้างระบบการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์เพื่องานก่อสร้างอาคารได้สำเร็จ และในปี ค.ศ. 2014 ได้ทำการพิมพ์บ้าน 10 หลังด้วยระบบการพิมพ์สามมิติ ซึ่งเป็นครั้งแรกที่มีการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมาใช้ในงานก่อสร้างของโครงการอสังหาริมทรัพย์ การพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติของ WINSUN ได้ก้าวข้ามขีดจำกัดเรื่องระยะเวลาการก่อสร้าง ผลลัพธ์จากการใช้เทคโนโลยีทำให้ WINSUN สามารถสร้างอาคารสูง 2 ชั้นได้โดยใช้เวลาในพื้นที่ก่อสร้างเพียงแค่ 2-3 วันเท่านั้น (ทั้งนี้ยังไม่นับรวมระยะเวลาในการเตรียมชิ้นงานที่ขึ้นรูปภายในโรงงาน) เป็นการแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ที่สามารถช่วยให้สถาปนิกและผู้รับเหมาสามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างอาคารลงได้อย่างมาก และทำให้คนงานสามารถทำงานในพื้นที่ก่อสร้างได้ง่ายขึ้น

ภาพที่ ผ.17 การทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ WINSUN. จาก http://3dprinting.com/wp-content/uploads/2014/04/24.jpg, 2015

ภาพที่ ผ.18 การก่อสร้างอาคารด้วยการพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ WINSUN. จาก http://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/01/b31.jpg, 2015

ภาพที่ ผ.19 การก่อสร้างอาคารด้วยการพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ WINSUN. จาก http://minionvilla.com/wp-content/uploads/2014/04/winsun-3d-printed-house-china.jpg, 2015

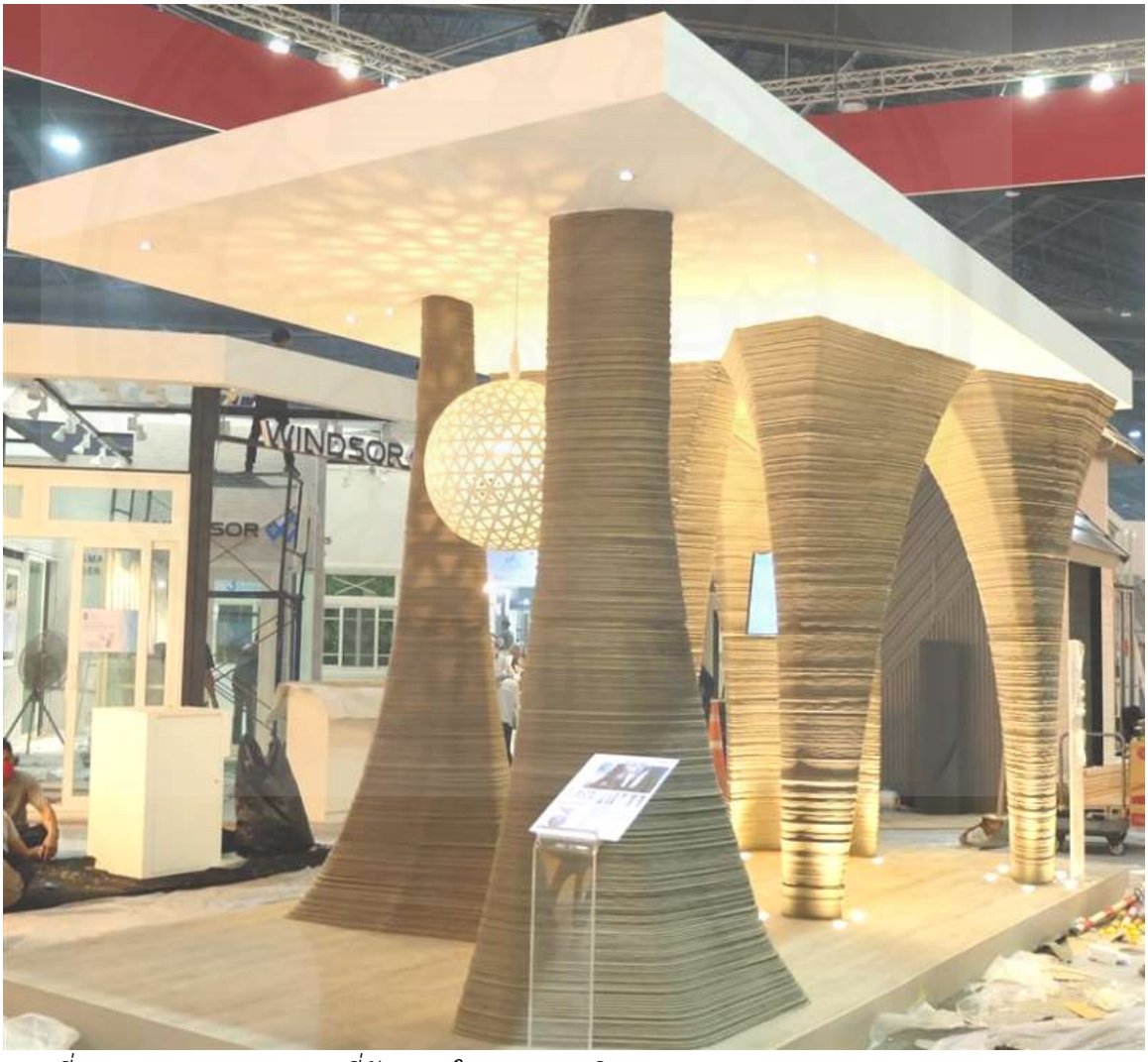
ภาพที่ ผ.20 อาคารที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติระบบ FDM ของ WINSUN. จาก http://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/01/b6.png, 2015

และในปี ค.ศ. 2015 ผู้นำสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์มีนโยบายพัฒนาเมืองให้เป็นศูนย์กลางทางด้านเทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและงานออกแบบของโลก จึงมีโครงการที่จะสร้างอาคารสำนักงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ รวมทั้งงานตกแต่งภายในและเฟอร์นิเจอร์ด้วย แสดงให้เห็นถึงความสำคัญและการเป็นที่ยอมรับในการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติไปใช้ทำงานสถาปัตยกรรมในระดับนานาชาติ

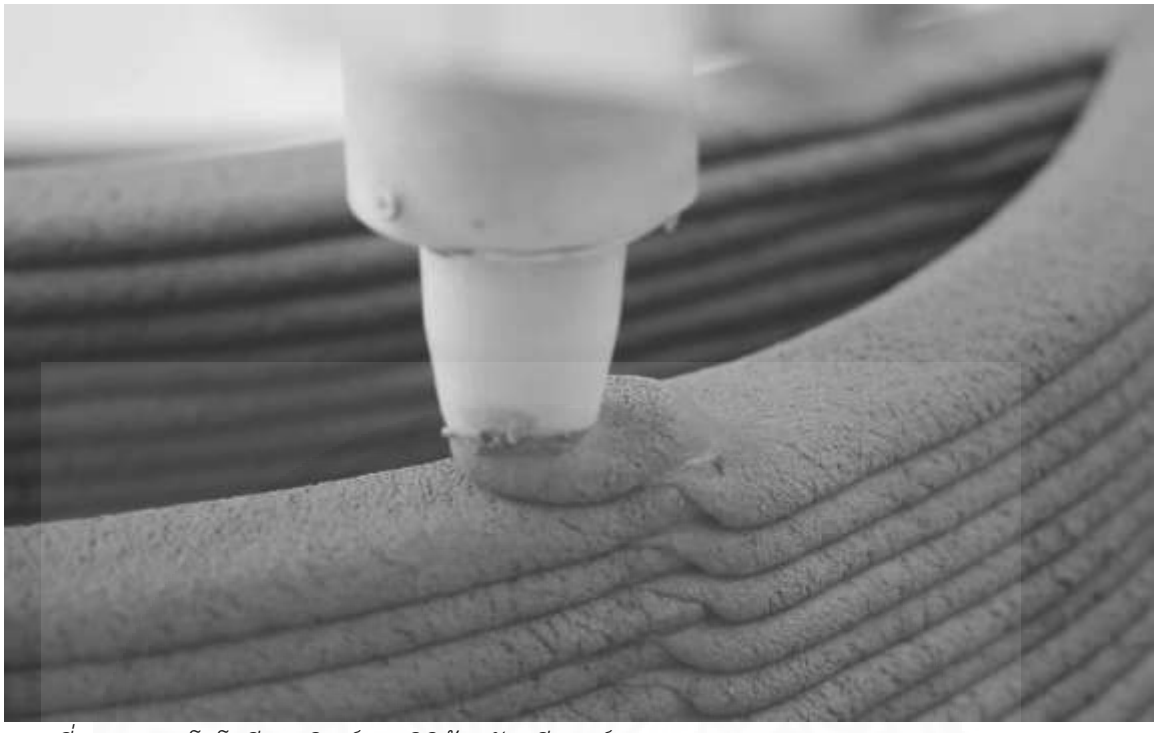
ภาพที่ ผ.21 งานออกแบบอาคารสำนักงานที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ. จาก http://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/06/d4.jpg, 2015

ภาพที่ ผ.22 งานออกแบบอาคารสำนักงานที่สร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ. จาก http://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/06/d22.png, 2015

สำหรับประเทศไทยมีผู้ที่พัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์รายใหญ่คือกลุ่มบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (SCG) การพัฒนามีจุดประสงค์เพื่อการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการแก้ปัญหาการขาดแคลนแรงงานก่อสร้างที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ โดยมีโจทย์ในการพัฒนาคือการพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้างให้สามารถสร้างได้รวดเร็ว มีความมั่นคงแข็งแรง และมีราคาถูก นอกจากนี้ยังศึกษาการนำเทคโนโลยีไปใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงอิสระ (freeform) โดยกลุ่มนักวิจัยจาก SCG ได้ศึกษาผ่านกระบวนการออกแบบร่วมกับสถาปนิก ผลของการศึกษาคือศาลา Y-BOX Pavilion ที่จัดแสดงในงานสถาปนิก'59 เมื่อวันที่ 26 เมษายน – 1 พฤษภาคม 2559 เป็นศาลาที่ประกอบขึ้นจากเสารูปทรงอิสระซึ่งขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ระบบ FDM ทั้งหมด และประดับศาลาด้วยโคมไฟรูปทรงกลมที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ระบบ SLS



ภาพที่ ผ.23 Y-BOX Pavilion ที่จัดแสดงในงานสถาปนิก'59. จาก https://3dprint.com/131560/scg-3d-printable-cement, 2016



ภาพที่ ผ.24 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ระบบ FDM ของ SCG. จาก https://3dprint.com/131560/scg-3d-printable-cement/, 2016

ภาพที่ ผ.25 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ระบบ FDM ของ SCG. จาก https://3dprint.com/131560/scg-3d-printable-cement/, 2016

ภาพที่ ผ.26 แผนภาพแสดงการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์. โดย ผู้วิจัย, 2558

จากการศึกษาการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ทำให้เห็นทิศทางของการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติสำหรับใช้ในงานสถาปัตยกรรม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ปี ค.ศ. 1892 - 1983 เป็นช่วงการเกิดแนวคิดที่มีอิทธิพลต่อการคิดค้นเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ

ปี ค.ศ. 1984 - 2000 เป็นช่วงการคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติให้สามารถใช้ได้จริง

ปี ค.ศ. 2001 มีการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมาใช้ในงานสถาปัตยกรรมเป็นครั้งแรก

ปี ค.ศ. 2002 - 2009 เป็นช่วงการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติให้สามารถใช้ทำงานสถาปัตยกรรมได้จริง

ปี ค.ศ. 2010 - 2011 มีการจัดตั้งศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติเพื่อใช้ในงานสถาปัตยกรรมขึ้นหลายแห่ง โดยมีการริเริ่มมาจากหน่วยงานทางด้านการศึกษาอย่างมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัย

ปี ค.ศ. 2012 - 2015 เป็นช่วงการตื่นตัวของผู้ใช้งานที่คิดจะนำเอาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติไปใช้ทำงานสถาปัตยกรรมมากขึ้น และเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติเพื่อการก่อสร้างสถาปัตยกรรมเริ่มเป็นที่ยอมรับมากขึ้นในวงการก่อสร้าง ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีได้ง่ายขึ้น และมีการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติไปใช้ในโครงการอสังหาริมทรัพย์

นอกจากนี้ Neri Oxman ซึ่งเป็นสถาปนิกและผู้เชี่ยวชาญทางด้านเทคโนโลยี ผู้ก่อตั้งกลุ่ม Mediated Matter จาก MIT Media Lab ได้ศึกษาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติเพื่อใช้ในงานสถาปัตยกรรม และได้สรุปทิศทางการพัฒนาของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในอนาคตไว้ 5 ประเด็น (Neri Oxman, 2013) ดังนี้

1. **Growth Over Assembly**

การพัฒนาเพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดในการขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติ ในอนาคตจะไม่ได้มีแค่การพิมพ์สามมิติอีกต่อไป แต่จะเป็นการพิมพ์แบบสี่มิติ คือการพัฒนาเทคโนโลยีให้หลังจากการพิมพ์ชิ้นงานออกมาแล้ว ชิ้นงานสามารถเปลี่ยนรูปได้ภายใต้การใช้งานหรือบริบทที่แตกต่างกัน

2. **Integration Over Segregation**

การพัฒนาเพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดทางด้านความซับซ้อนของการพิมพ์สามมิติ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในปัจจุบันยังต้องพิมพ์ชิ้นงานแยกส่วนกัน ทั้งข้อจำกัดทางด้านขนาด วัสดุที่ใช้ หรือรูปทรงของชิ้นงาน ซึ่งการพิมพ์สามมิติในอนาคตจะต้องสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่จำเป็นต้องแยกส่วนกันเลย

3. **Heterogeneity Over Homogeneity**

การพัฒนาเพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดทางด้านความหลากหลายของวัสดุที่พิมพ์ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในปัจจุบันจะสามารถพิมพ์วัสดุได้เพียงแค่ 1 – 2 วัสดุในเวลาเดียวกัน ซึ่งในอนาคตจะต้องพิมพ์วัสดุได้หลากหลายมากกว่านั้น

4. **Difference over Repetition**

การพัฒนาเพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดในความหลากหลายของรูปแบบการพิมพ์ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในปัจจุบันสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีเพียงแค่คุณสมบัติเดียว ในอนาคตการพิมพ์สามมิติจะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีคุณสมบัติหลากหลายในชิ้นเดียว เช่น การขึ้นรูปเก้าอี้ที่มีคุณสมบัติการรับแรงที่แตกต่างกันในแต่ละส่วน

5. **Material is the New Software**

การพัฒนาเพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดทางด้านวัสดุ เนื่องจากวัสดุเองก็เป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เทคโนโลยีพัฒนาไปได้ ดังนั้นการพัฒนาทางด้านวัสดุศาสตร์จึงจะช่วยทำลายข้อจำกัดของเทคโนโลยีในปัจจุบันได้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธนัท ศักดานรเศรษฐ์
วันเดือนปีเกิด	1 มิถุนายน 2535
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2556: วิทยาศาสตรบัณฑิต (สถาปัตยกรรม) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

ธนัท ศักดานรเศรษฐ์ และ ศ.ดร. วิมลสิทธิ์ หรยางกูร. (กรกฎาคม 2559). *แนวทางการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ กรณีศึกษา: การออกแบบศาลาอเนกประสงค์.* งานการประชุมวิชาการ Built Environment Research Associates Conference ครั้งที่ 7 ประจำปี 2559 (BERAC 7, 2016), คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี