

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Study of the flexural behavior of beam from 3D printing formwork



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานจากการใช้แบบ ด้วยการพิมพ์ 3 มิติ
โดย	น.ส.ณัฐฐา เวสสะภักดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)	กรรมการ
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลาภยศ ประเสริฐโสภิน)	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
.....	
(อาจารย์ ดร.ปัญญาวุฒ จิรติลล)	

ณัฐา เวสสะภักดี : การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ. ( Study of the flexural behavior of beam from 3D printing formwork) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข

ในปัจจุบันลักษณะการออกแบบทางด้านสถาปัตยกรรมมีความหลากหลายและซับซ้อนมากขึ้นทำให้งานก่อสร้างประสบปัญหาในการตั้งแบบหล่อขึ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ เช่น คานโค้งหรือคานรูปทรงอิสระ (Free-form beam) ซึ่งยากต่อการทำงาน แต่ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติที่มีความสามารถในการพิมพ์รูปร่างหรือรูปทรงต่างๆของชิ้นงานได้อย่างอิสระโดยไม่ต้องใช้ไม้แบบ จึงเป็นส่วนช่วยในการแก้ปัญหาข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่ใช้กรอบแบบจากการพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ กรอบแบบดังกล่าวถูกพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบระบบฉีดเส้นวัสดุ หรือ Fused Deposition Modeling (FDM) ซึ่งเป็นการพิมพ์ขึ้นรูปคอนกรีตซ้อนกันไปจนได้เป็นกรอบแบบ ในการวิจัยนี้ได้สร้างกรอบแบบที่มีความหนาของแต่ละชั้นการพิมพ์แตกต่างกันไปจนได้เป็นกรอบแบบ ในการวิจัยนี้ได้สร้างกรอบแบบที่มีความหนาของแต่ละชั้นการพิมพ์แตกต่าง 3 แบบ ได้แก่ ชั้นการพิมพ์ความหนา 15.0 มม. (BH1.50) 17.5 มม. (BH1.75) และ 20.0 มม. (BH2.00) แล้วจึงหล่อคานคอนกรีตภายในกรอบแบบนั้น จากนั้นคานตัวอย่างจะถูกพิจารณาคุณสมบัติด้านการรับกำลังแบบคานช่วงเดียว (Simple beam) และสังเกตลักษณะการวิบัติของคานที่เกิดขึ้น ผลการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลเพื่อหาความแตกต่างจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ไม้แบบตามปกติ (NB)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....



# # 6372035321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: 3D printing technology Beam Flexural behavior

Nuttha Wassapakdee : Study of the flexural behavior of beam from 3D printing formwork. Advisor: Assoc. Prof. WITHIT PANSUK, Ph.D.

Currently, the design of architectural structures has become increasingly diverse and complex, leading to construction challenges in setting up various structural components such as curved beams or free-form beams. These components pose difficulties in construction. However, with the advancement of 3D printing technology, which has the capability to freely print shapes or forms of components without the need for formwork, it becomes a helpful tool in addressing the aforementioned problems. Therefore, the objective of this research is to study the flexural behavior of 3D-printed concrete beams using a frame-based approach. The frames were printed using the Fused Deposition Modeling (FDM) technique, which prints layered concrete frames by extruding material. In this study, three different layer thicknesses of the printed frames were created: 15.0 mm (BH1.50), 17.5 mm (BH1.75), and 20.0 mm (BH2.00). Subsequently, concrete beams were cast within these frames. The beams' behavior under a simply supported condition was examined, and the observed characteristics of the beams were analyzed and compared to conventionally reinforced concrete beams (NB) using timber formwork.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิตินี้มีอาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิต ปานสุข ที่ท่านได้คอยให้คำชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เผชิญในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ท่านอาจารย์รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จงวิวัฒน์สกุล ที่ช่วยเหลือเรื่องของอุปกรณ์การทดสอบ ท่านอาจารย์ ดร.ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์ และท่านอาจารย์ ดร.ลาภยศ ประสิทธิ์โสภิน ที่ได้แนะนำความรู้เกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานโครงสร้างที่พิมพ์ 3 มิติ และท่านอาจารย์ ดร.พรเพ็ญ ลิมนิลชาติ ที่ช่วยแนะนำแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูล

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณบริษัท SCG ที่ช่วยพิมพ์กรอบแบบคาน และให้ความรู้ด้านการใช้งานนวัตกรรมเครื่องพิมพ์ 3 มิติให้เหมาะสมกับงานศึกษานี้ และสิ่งที่ขาดไม่ได้คือการทดสอบดังนั้นการทดสอบตัวอย่างคานต่างๆจะไม่สำเร็จเลยหากปราศจาก Dr.Sandeep Mekhara Shanmughan Dr.Thwe Thwe Win ดร.ภัทรพล จินดาศิริพันธ์ ดร.อดิชน คุณาวิศรุต คุณสมพงษ์ ขำแจ้ง คุณอดิศร ชวนปี คุณกานต์ธิปก ฮามคำไพ คุณชญาณิชฐ์ ปัญญาสุทธิ์

คุณชนากานต์ กสิปทุม คุณอธิวัฒน์ ทองถวน คุณเพ็ญชิสสา จันทร์วิเศษสิน คุณทรงกลด วงศ์เจริญ คุณนุชย์ เหร่าหมัด และคุณกันตวิชญ์ สุพรรณแสง ที่ช่วยเหลือไม่ว่าจะเป็นด้านข้อมูลการใช้เครื่องมือการทดสอบยกตัวอย่างเช่น การติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดและการโค้ง เป็นต้น การสังเกตรอยร้าวในตัวอย่างคานและการวาดรอยร้าวพร้อมกับระบุแรงกระทำจนกระทั่งการทดสอบตัวอย่างคานสามารถบรรลุผ่านไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ณัฐฐา เวสสะภักดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 รูปแบบเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ.....	5
2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติในด้านการก่อสร้าง .....	8
2.3 วัสดุซีเมนต์ที่นำมาใช้กับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ.....	10
2.4 หลักการพิมพ์วัสดุขึ้นงานคอนกรีตด้วยเทคโนโลยี 3 มิติ แบบ FDM.....	13
2.5 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	16
2.5.1 การออกแบบวิธี SDM.....	16
2.5.2 การจำลองแบบแรงอัด-แรงดึง (Strut and Tie Model) .....	25
2.6 ลักษณะการแตกร้าวในคานคอนกรีต.....	31
2.6.1 คานคอนกรีต .....	31

2.6.2	คานสลึคคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	33
2.6.3	คานที่พิมพ์กรอบแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ.....	38
2.6.4	คานสลึคที่พิมพ์กรอบแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ .....	42
2.7	กรณีศึกษาพฤติกรรมของการรับแรงของผนังที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ .....	44
2.7.1	Load carrying capacity and failure mode of 3D printing mortar wall panel under axial compression loading (Jiramarootapong et al., 2020).....	44
2.7.2	3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete (Furet et al., 2019) .....	49
2.8	กรณีศึกษาพฤติกรรมของการรับแรงของคานที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ .....	52
2.8.1	Effect of 3D Printed Spatial Reinforcement on Flexural Characteristics of Conventional Mortar (Katzer & Szatkiewicz, 2020) .....	52
2.8.2	Performance of concrete beam reinforced with 3D printed Bioinspired primitive scaffold subjected to three-point bending (Nguyen-Van et al., 2022).....	58
2.9	ช่องว่างของงานวิจัยที่ผ่านมา .....	63
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	64
3.1	วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	64
3.1.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย .....	64
3.2	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	66
3.2.1	เตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	67
3.2.2	การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อผลิตตัวอย่างคาน .....	71
3.2.3	การทดสอบแรงดัด (Bending Testing).....	75
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล .....	76
4.1	การวิเคราะห์แรงกระทำโครงสร้างด้วยวิธีแบบแรงอัด-แรงดึง (Strut and Tie Method) ....	76
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่ง (Load-Deflection Relationship).....	77

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียด (Load-Strain Relationship).....	79
4.4 ลักษณะการวิบัติ (Failure Mode).....	91
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	95
5.1 บทสรุปของการศึกษา .....	95
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	96
บรรณานุกรม.....	98
ประวัติผู้เขียน .....	102



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 การทดสอบแรงอัดของตัวอย่างที่ขึ้นกับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง (Demyanenko et al., 2018).....	12
ตารางที่ 2 สรุปข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติด้วยวัสดุซีเมนต์ (นรเศรษฐ์ et al., 2015).....	14
ตารางที่ 3 ค่า $\beta_n$ และ $\beta_s$ สำหรับโหนดและส่วนรับแรงอัด.....	27
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคานตัวอย่างต่างๆ ที่เสริมวัสดุรับแรงดัด (Al-Chaar & Kozych, 2020) .	40
ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคานตัวอย่างต่างๆ (Gebhard et al., 2021) .....	43
ตารางที่ 6 การเตรียมขนาดชิ้นงานเพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังอัด (Jiramarootapong et al., 2020) .....	46
ตารางที่ 7 การเตรียมขนาดชิ้นงานเพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังดัด (Jiramarootapong et al., 2020) .....	46
ตารางที่ 8 การเตรียมขนาดชิ้นงาน (Katzer & Szatkiewicz, 2020).....	53
ตารางที่ 9 คุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์ (Nguyen-Van et al., 2022).....	58
ตารางที่ 10 คุณสมบัติเชิงกลของ ABS (Nguyen-Van et al., 2022) .....	59
ตารางที่ 11 องค์ประกอบของการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ (Nguyen-Van et al., 2022).....	59
ตารางที่ 12 คุณสมบัติการรับกำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ .....	67
ตารางที่ 13 คุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์.....	67
ตารางที่ 14 คุณสมบัติการรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต .....	68
ตารางที่ 15 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริม .....	69
ตารางที่ 16 ขนาดของคานตัวอย่าง .....	71
ตารางที่ 17 การวิเคราะห์แรงกระทำโครงสร้างด้วยวิธีแบบแรงอัด-แรงดึง (Strut-Tie Structures) 77	
ตารางที่ 18 ผลลัพธ์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งของคานแต่ละรูปแบบ .....	78



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ตัวอย่างอาคารบ้าน 2 ชั้น (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2562).....	2
รูปที่ 2 ตัวอย่างลักษณะการพิมพ์ 3 มิติด้วยคอนกรีต (Garcia, 2023).....	3
รูปที่ 3 องค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ SLS (FORMLABS, 2021).....	5
รูปที่ 4 องค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ Right-Side Up SLA (FORMLABS, 2017).....	6
รูปที่ 5 องค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ Upside-Down (Inverted) SLA (FORMLABS, 2017).....	7
รูปที่ 6 กระบวนการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM (Olivera et al., 2016) .....	8
รูปที่ 7 ลักษณะการพิมพ์ที่ซ้อนทับกันของคอนกรีตด้วยการเพิ่มมุมมองในชั้นถัดไป 10 องศา (Pham et al., 2022) .....	9
รูปที่ 8 ตัวอย่างข้อจำกัดของการพิมพ์ที่เป็นคานยื่น .....	10
รูปที่ 9 ตัวอย่างข้อจำกัดของการพิมพ์ที่แบบการซ้อนทับแบบชั้นบันได .....	10
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบส่วนผสมของมอร์ตาร์ (a) มอร์ตาร์ที่พัฒนาแล้ว (b) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย (c) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย (Fly ash) และ (d) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของ Metakaolin (Teixeira et al., 2021).....	12
รูปที่ 11 ลักษณะการขึ้นรูปของคอนกรีตแบบ Extrusion Deposition (Wangler et al., 2016)...	13
รูปที่ 12 ลักษณะกระบวนการขึ้นรูปแบบ Powder Bed and Inkjet Head (Waheed et al., 2016).....	14
รูปที่ 13 ลักษณะรูปแบบของเปลือก (Shell) และส่วนเติมเต็ม (Infill) (นรเศรษฐ์ et al., 2015)....	16
รูปที่ 14 ลักษณะการเกิดแรงและหน่วยแรงในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงดัด .....	17
รูปที่ 15 ลักษณะการเกิดแรงและหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงอัดและแรงดัดภายใต้แรงดัด .....	20
รูปที่ 16 สภาวะที่เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก .....	22
รูปที่ 17 องค์ประกอบในแบบจำลองแรงอัด-แรงดัด .....	25



รูปที่ 18 บริเวณ B-regions และ D-regions.....	26
รูปที่ 19 ลักษณะจุดเชื่อมต่อต่างๆ ของแบบจำลองแรงอัด-แรงดึง.....	27
รูปที่ 20 ลักษณะรูปแบบทั่วไปของส่วนรับแรงอัด (ลี้มสุวรรณ, 2565).....	28
รูปที่ 21 ตัวอย่างการจำลองพฤติกรรมแรงภายในโครงสร้างคอนกรีต.....	28
รูปที่ 22 ลักษณะการแตกร้าวในคานคอนกรีต.....	33
รูปที่ 23 ลักษณะของ (ก) อัตราส่วนระหว่างช่วงความยาวต่อความลึก ( $l_n / h$ ) (ข) อัตราส่วนระหว่างช่วงการเฉือนต่อความลึก ( $a / h$ ) และ (ค) อัตราส่วนระหว่างช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ( $a / d$ ).....	34
รูปที่ 24 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของคานลึกลงจากงานวิจัยของ อมรภิญโญ and ธีระวงษ์ (2017).	36
รูปที่ 25 การเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนในคานลึกลงในรูปแบบต่างๆ (Sayyad & Patankar, 2013).....	37
รูปที่ 26 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน (Sayyad & Patankar, 2013).....	38
รูปที่ 27 ลักษณะการพิมพ์คานตัวอย่าง (Al-Chaar & Kozych, 2020).....	39
รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับการโก่งตัวของคานตัวอย่างที่เกิดขึ้น (Al-Chaar & Kozych, 2020).....	39
รูปที่ 29 ลักษณะพิมพ์และการเสริมเหล็กรับแรงดึงในคาน (Gebhard et al., 2021).....	41
รูปที่ 30 ลักษณะการแตกร้าวในคานที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ (Gebhard et al., 2021).....	41
รูปที่ 31 ลักษณะพิมพ์และการเสริมเหล็กแรงดึงในคานลึกลง (Gebhard et al., 2021).....	42
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับการโก่งตัวของคานตัวอย่างที่เกิดขึ้น (Gebhard et al., 2021).....	43
รูปที่ 33 ลักษณะการแตกร้าวในคานลึกลงที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ (Gebhard et al., 2021).....	44
รูปที่ 34 รูปแบบการพิมพ์ตัวอย่างชิ้นงาน (Jiramarootapong et al., 2020).....	45
รูปที่ 35 การพิมพ์ผนัง (3DP) (Jiramarootapong et al., 2020).....	46
รูปที่ 36 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Jiramarootapong et al., 2020).....	47

รูปที่ 37 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด (Jiramarootapong et al., 2020).....	47
รูปที่ 38 ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างเนื่องจากกำลังรับแรงอัด (Jiramarootapong et al., 2020).....	48
รูปที่ 39 ลักษณะการวิบัติของโครงสร้างผนังที่เกิดจากแรงดัด (Jiramarootapong et al., 2020)..	48
รูปที่ 40 ตัวอย่างการพิมพ์ชิ้นงาน (Furet et al., 2019).....	50
รูปที่ 41 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ และการพิมพ์ Yhnova™ (Furet et al., 2019).....	51
รูปที่ 42 ตัวอย่างที่อยู่อาศัย Yhnova™ (Furet et al., 2019) .....	51
รูปที่ 43 ลักษณะองค์ประกอบของการพิมพ์ 3 มิติ ของผนังทงเหลี่ยม (Katzer & Szatkiewicz, 2020).....	52
รูปที่ 44 ลักษณะรอยแตกร้าวของคาน (Katzer & Szatkiewicz, 2020) .....	54
รูปที่ 45 ลักษณะความยืดหยุ่นในการรับแรงดัดของคานทดสอบที่แรงกระทำ (Katzer & Szatkiewicz, 2020).....	54
รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (F) – การโก่งตัว (d) ของชิ้นงานที่ทดสอบโดยมีจุด คุณลักษณะสี่จุด (ค่าของโหนดที่ได้รับสำหรับแต่ละจุดสำคัญแสดงไว้ [N]) (Katzer & Szatkiewicz, 2020).....	56
รูปที่ 47 ลักษณะความยืดหยุ่นในการรับแรงดัดของคานทดสอบที่แรงกระทำสูงสุดครั้งแรก (Katzer & Szatkiewicz, 2020).....	57
รูปที่ 48 ลักษณะความยืดหยุ่นในการรับแรงดัดของคานทดสอบที่สำหรับ L/150 (Katzer & Szatkiewicz, 2020).....	57
รูปที่ 49 ลักษณะความยืดหยุ่นในการรับแรงดัดของคานทดสอบที่สำหรับ L/75 (Katzer & Szatkiewicz, 2020).....	58
รูปที่ 50 ลักษณะการพิมพ์ตัวอย่างเป็นลูกบาศก์ (Nguyen-Van et al., 2022).....	59
รูปที่ 51 ลักษณะการพิมพ์ NRC beam (Nguyen-Van et al., 2022).....	60
รูปที่ 52 ลักษณะการพิมพ์ PC1 beam (Nguyen-Van et al., 2022).....	60
รูปที่ 53 ลักษณะการพิมพ์ PC2 beam (Nguyen-Van et al., 2022).....	61

รูปที่ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) (a) NRC beam (b) PC1 beam และ (c) PC2 beam (Nguyen-Van et al., 2022).....	62
รูปที่ 55 ลักษณะรอยแตกร้าวจากการวิเคราะห์ FEM และ การทดสอบตัวอย่าง (a) NRC beam (b) PC1 beam และ (c) PC2 beam (Nguyen-Van et al., 2022) .....	62
รูปที่ 56 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	64
รูปที่ 57 ตัวอย่างเครื่องพิมพ์แบบ FDM .....	65
รูปที่ 58 Flexural Testing Machine .....	65
รูปที่ 59 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	66
รูปที่ 60 กรอบไม้แบบคานคอนกรีตปกติ (NB).....	69
รูปที่ 61 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ .....	70
รูปที่ 62 ตัวอย่างลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ .....	71
รูปที่ 63 ตำแหน่งของคานชั้นที่ 2 (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2562).....	72
รูปที่ 64 ลำดับขั้นตอนการผูกเหล็กคาน และการติดตั้ง Strain gauge สำหรับติดเหล็ก.....	73
รูปที่ 65 ลักษณะการขึ้นรูปของคาน.....	74
รูปที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งของคาน .....	78
รูปที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน BH1.50 .....	80
รูปที่ 68 การกระจายความเครียดของคาน BH1.50 .....	82
รูปที่ 69 ตัวอย่างการกระจายความเครียดที่ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH1.50 ที่แรงกระทำ 173.45 กิโลนิวตัน .....	82
รูปที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน BH1.75 .....	84
รูปที่ 71 การกระจายความเครียดของคาน BH1.75 .....	85
รูปที่ 72 ตัวอย่างการกระจายความเครียดที่ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH1.75 ที่แรงกระทำ 105.94 กิโลนิวตัน .....	86
รูปที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน BH2.00 .....	87
รูปที่ 74 การกระจายความเครียดของคาน BH2.00 .....	89

รูปที่ 75 ตัวอย่างการกระจายความเครียดที่ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH2.00 ที่แรงกระทำ 116.71 กิโลนิวตัน ..... 89

รูปที่ 76 การวิบัติของแรงยึดเหนี่ยวในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติ ..... 91

รูปที่ 77 ลักษณะการวิบัติของคาน ..... 93

รูปที่ 78 ลักษณะการวิบัติของคานที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติที่บริเวณกรอบแบบและภายในคอนกรีตที่เต็ม ..... 94



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากสถานการณ์ของโรคระบาดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) ทำให้เกิดปัญหาด้านการผลิตสินค้า เพราะขาดแคลนทรัพยากรมนุษย์จึงส่งผลให้ภาคการส่งออกหยุดชะงัก ดังนั้นจึงปฏิเสธไม่ได้ว่าเทคโนโลยีได้เข้ามามีส่วนสำคัญในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว และทำให้มีความสะดวกรวดเร็วมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาของเทคโนโลยีเครื่องจักรที่ได้ถูกนำมาใช้แทนทรัพยากรมนุษย์ นั่นก็คือเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาให้เข้ากับอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เช่น ด้านการแพทย์ที่ใช้เทคโนโลยีสำหรับการผลิตยาครั้งละจำนวนมาก ด้านอุตสาหกรรมเครื่องจักร และอุตสาหกรรมการผลิตอะไหล่รถยนต์ ด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง และอื่นๆ ซึ่งมีข้อมูลทางสถิติจากหลายแหล่งคาดการณ์การเติบโตในอนาคต เช่น รายงานการวิเคราะห์ข้อมูลตลาดเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จากทั่วโลกของ Vantage Market Research พบว่า ในช่วงปี ค.ศ. 2021 คิดเป็นมูลค่าประมาณ 11.1 พันล้านเหรียญสหรัฐ และคาดการณ์ว่าในช่วงปี ค.ศ. 2028 มูลค่าตลาดจะมีการเติบโตไปถึง 35.36 พันล้านเหรียญสหรัฐ โดยคิดอัตราการเติบโตต่อปี (CAGR) อยู่ที่ประมาณร้อยละ 18 และบทความผลการสำรวจข้อมูลเชิงสถิติของเศรษฐศาสตร์ในช่วงปี ค.ศ. 2019 ของอุตสาหกรรมก่อสร้างเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยคอนกรีต พบว่า มีมูลค่าประมาณ 19.8 ล้านเหรียญสหรัฐ และมีการคาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2027 จะมีมูลค่า 477.1 พันล้านเหรียญสหรัฐ โดยอัตราการเติบโตต่อปีคิดเป็นร้อยละ 322.6 ซึ่งถือว่าเป็นการเติบโตที่สูงมาก (DUBLIN, 2021)

ปัจจุบันเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างเพื่อตอบสนองความต้องการด้านสถาปัตยกรรมของอาคารในรูปแบบต่างๆ ที่ต้องการผลลัพธ์ในรูปแบบของอาคารที่แปลกใหม่และสวยงามขึ้น ในด้านวิศวกรรมเทคโนโลยีดังกล่าวมีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาทางก่อสร้าง ในที่นี้จะยกตัวอย่างปัญหาที่เกี่ยวกับการทำงานที่ต้องการมีรูปแบบของผนังที่ซับซ้อน เช่น ผนังที่มีส่วนโค้งที่ค่อนข้างมาก หรือการทำผนังให้มีส่วนที่นูน และเว้า เสาที่มีงานของบัวที่ซับซ้อน และคาน เป็นต้น โดยงานสถาปัตยกรรมข้างต้นมีความยากสำหรับการก่อสร้างและการใช้เวลานาน และอาจมีความคลาดเคลื่อนจากฝีมือของช่างก่อสร้างที่ไม่มีประสบการณ์ที่มากเพียงพอ อีกทั้งต้องมีการใช้งานไม้แบบที่มากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นปัญหาของภาวะโลกร้อน ดังนั้น เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถตอบโจทย์ได้ดียิ่งขึ้น โดยเราสามารถการพิมพ์รูปแบบของอาคารได้ตามความต้องการ และช่วยลดปัญหาของปริมาณการใช้ไม้แบบ และการใช้ทรัพยากรมนุษย์ อีกทั้งเป็นวิธีที่

สามารถช่วยให้เราสามารถทำงานได้ตามความต้องการในการพิมพ์ผนัง เสา และคานที่มีรูปทรงหลากหลาย และมีระยะเวลาก่อสร้างที่รวดเร็วยิ่งขึ้น

การศึกษานี้ได้สนใจศึกษากรณีการสร้างอาคารบ้าน 2 ชั้นด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยทั่วไปการสร้างอาคารบ้าน 2 ชั้นแสดงดังรูปที่ 1 จะใช้การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรูปแบบการถ่ายน้ำหนักของโครงสร้างพื้นสู่คาน คานสู่เสา และถ่ายน้ำหนักลงสู่ฐานราก แต่ส่วนใหญ่การพิมพ์ 3 มิติจะใช้รูปแบบการถ่ายน้ำหนักลงผนังหรือกำแพงเพื่อรับแรงอัดเพียงอย่างเดียว แต่ในรูปที่ 1 ตรงบริเวณด้านหน้าอาคารจะไม่มีแนวของผนังที่ช่วยในการรับน้ำหนักของโครงสร้างพื้นชั้นที่ 2 จะเห็นว่ามีการใช้คานรับน้ำหนักและถ่ายน้ำหนักสู่เสา และมีทางเข้าอาคารชั้นที่ 1 เป็นช่องว่าง ซึ่งหลักการทำงานของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะต้องพิมพ์ซ้อนทับกันอย่างต่อเนื่อง แต่ถ้ามีบริเวณช่องว่างยกตัวอย่างเช่น บริเวณหน้าต่างและประตูจะต้องมีการตั้งค้ำยันช่วยจึงจะสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 2 แต่โครงสร้างที่ถูกพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติจะเป็นวัสดุคอนกรีตที่มีสามารถรับแรงอัดได้ดีแต่ไม่สามารถรับแรงดึงได้จึงจำเป็นต้องมีการเสริมเหล็กเพื่อช่วยรับแรงดึง เมื่อพิจารณาถึงคานชั้นที่ 2 บริเวณที่กล่าวข้างต้นจำเป็นต้องออกแบบเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับน้ำหนักจากโครงสร้างด้านบน ดังนั้น การวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กรอบแบบหล่อด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 1 ตัวอย่างอาคารบ้าน 2 ชั้น (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2562)



รูปที่ 2 ตัวอย่างลักษณะการพิมพ์ 3 มิติด้วยคอนกรีต (Garcia, 2023)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของคานช่วงเดียว (Simple beam) ที่เกิดจากการพิมพ์กรอบแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) มีความแตกต่างจากพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติอย่างไร และสามารถใช้มาตรฐานการออกแบบเดียวกันได้หรือไม่

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ ด้วยวิธีการทดสอบแรงกระทำแบบ 3 จุด หรือการดัดงอที่กึ่งกลาง โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.3.1 ทดสอบกำลังดัดของคานคอนกรีตที่มีอายุ 28 วัน

1.3.2 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต เท่ากับ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ 27.47 เมกะปาสคาล ของแท่งทดสอบทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน

1.3.3 ขนาดของคานที่ใช้ทดสอบมีขนาดกว้าง (B) x สูง (H) x ยาว (L) เท่ากับ 200 X 500 X 1700 มิลลิเมตร

1.3.4 เสริมเหล็กรับแรงดัดด้วยเหล็กข้ออ้อย DB16 ตามมาตรฐาน มอก.24 (2559) ที่ชั้น  
คุณภาพ SD-40 และเสริมเหล็กปลอกด้วยเหล็กกลม RB6 ตามมาตรฐาน มอก.20 (2559) ที่ชั้น  
คุณภาพ SD-24

1.3.5 พิจารณาเฉพาะเหล็กรับแรงดึง (เหล็กตามยาว) ภายใต้ความสามารถรับแรงเฉือน  
ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 318-19 (2019) หรือ วสท.011008-21 (2564)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสามารถในการรับแรงดัดของคานที่ใช้แบบหล่อที่สร้างขึ้นจากการพิมพ์ 3 มิติ
2. ช่วยลดการทำงานก่อสร้างที่ซับซ้อน
3. ช่วยลดปริมาณการใช้ไม้แบบ





## บทที่ 2

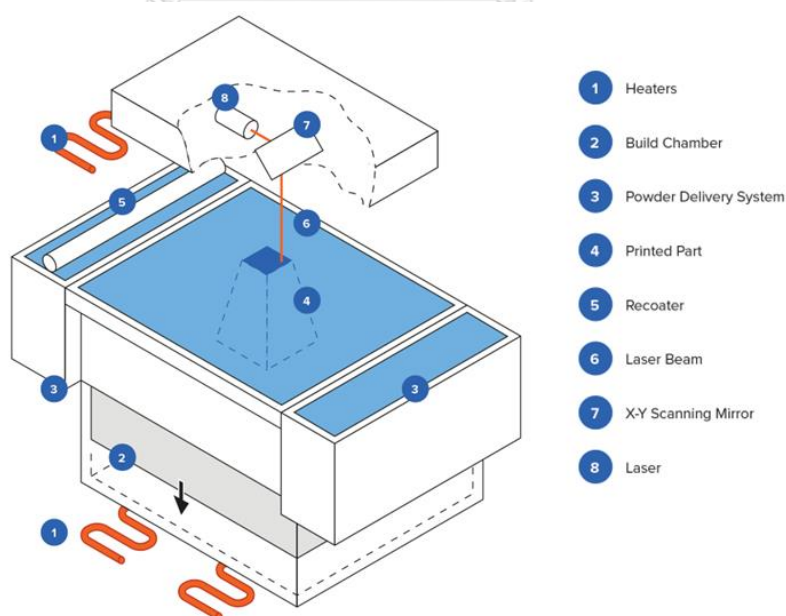
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 รูปแบบเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีบทบาทมากขึ้นและเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอะไหล่และเครื่องจักรด้านการผลิตสิ่งทอ อุตสาหกรรมการก่อสร้างและอุตสาหกรรมด้านการแพทย์ เป็นต้น โดยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้ต่อไปนี้

##### 1. Selective Laser Sintering (SLS)

เป็นเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ แบบเติมเนื้อวัสดุแบบแรกที่พัฒนาขึ้นโดย Dr. Carl Deckard และ Dr. Joe Beaman ในช่วงกลางปี ค.ศ. 1980 ที่ University of Texas at Austin ถูกพัฒนาและดัดแปลงให้สามารถใช้งานได้กับวัสดุที่หลากหลาย โดย SLS เป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้ลำแสงเลเซอร์ในการหลอมละลายวัสดุ เช่น พลาสติก โลหะ แก้วและวัสดุผสมอื่นๆ ให้เป็นของแข็งตามรูปแบบที่ต้องการจากไฟล์ออกแบบวัสดุ 3 มิติ โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน เครื่องพิมพ์ชนิดนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมผลิตสินค้าที่หลากหลาย ได้แก่ เสื้อผ้า อะไหล่ และอุปกรณ์ของเครื่องจักร เป็นต้น โดยองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ SLS แสดงดังรูปที่ 3

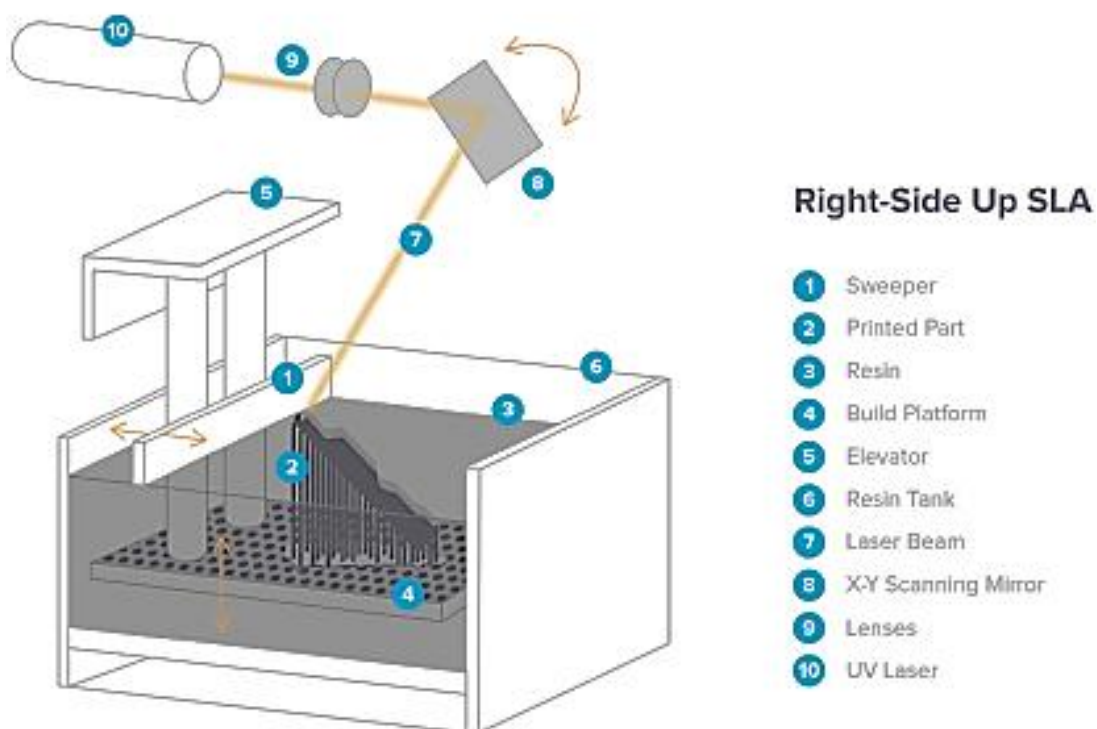


Schematic of the selective laser sintering process. SLS uses a high power laser to sinter small particles of polymer powder into a solid structure based on a 3D model.

รูปที่ 3 องค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ SLS (FORMLABS, 2021)

## 2. Stereolithography (SLA)

เป็นเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต ถูกค้นพบโดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่น Dr. Hideo Kodama ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1970 และถูกจดสิทธิบัตรเทคโนโลยีในปี ค.ศ. 1986 โดย Charles (Chuck) W. Hull ภายใต้คำว่า “Stereolithography” โดย SLA เป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้เทคโนโลยีการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกโดยใช้ลำแสงอัลตราไวโอเล็ตยิงไปที่ตำแหน่งที่ต้องการพิมพ์อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ผงหรือเม็ดวัสดุพลาสติกหลอมละลายและประสานตัวกันเป็นชั้นและทำชั้นตอสดังกล่าวซ้ำจนกระทั่งได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ นอกจากนี้เครื่องพิมพ์แบบ SLA ยังสามารถผลิตตัวอย่างจากเม็ดพลาสติกออกมาได้ในรูปแบบที่หลากหลาย โดยมีความละเอียดและแม่นยำสูง เครื่องพิมพ์ชนิดนี้ได้รับความนิยมในการนำไปใช้สำหรับการผลิตสินค้าประเภทพลาสติกที่ต้องการคุณภาพสูง เช่น เครื่องประดับและอุปกรณ์ด้านทันตกรรม เป็นต้น โดยเครื่องพิมพ์แบบ SLA จัดอยู่ในกลุ่มเทคโนโลยีการผลิตสารเติมแต่งที่เรียกว่า “Vat Photopolymerization” โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิดนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ Right-Side Up SLA และ Upside-Down (Inverted) SLA ซึ่งมีองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ



*Schematic of the right-side up SLA systems.*

รูปที่ 4 องค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ Right-Side Up SLA (FORMLABS, 2017)



Schematic of the upside-down (Inverted) SLA systems

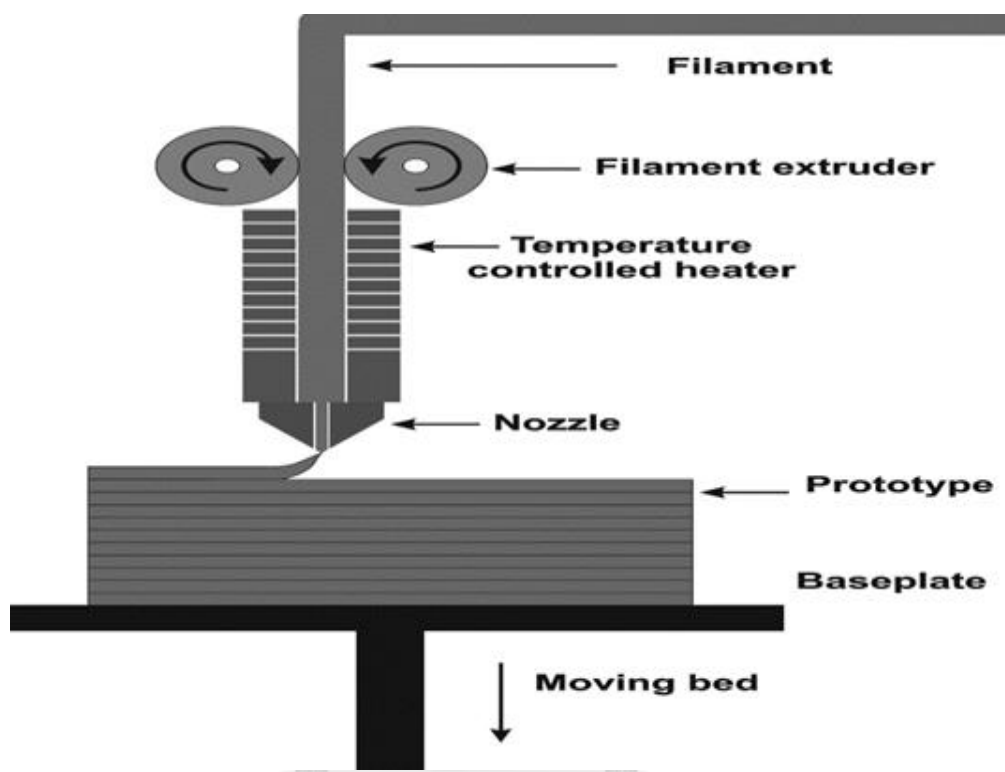
รูปที่ 5 องค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ Upside-Down (Inverted) SLA (FORMLABS, 2017)

### 3. Fused Deposition Modeling (FDM) หรือ Fused Filament Fabrication (FFF)

เทคโนโลยี FDM ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1988 โดย Scott และ Lisa Crump ผู้ก่อตั้ง Stratasys และจดสิทธิบัตรเทคโนโลยี FDM ในปี ค.ศ. 1989 โดยมีหลักการทำงานของวิธีนี้จะต้องเริ่มต้นด้วยการสร้างกระบวนการแปลงข้อมูลที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบหรือ Computer-Aided Design (CAD) ที่เก็บข้อมูลสำหรับโมเดล 3 มิติที่เรียกว่า “Standard Triangle Language (STL)” ที่ใช้ในเทคนิคการพิมพ์ Stereolithography (SLA) เปลี่ยนเป็นข้อมูลรูปแบบอื่นๆ เพื่อกำหนดวิธีการพิมพ์เป็นชั้นๆ หรือการแบ่งวัตถุออกเป็นชั้น (Layer) (Hiemenz, 2011) ยกตัวอย่างเช่นการใช้ภาษาโปรแกรมเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่สร้างข้อมูลในนามสกุล G-Code (.gcode) ที่นิยมใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เทคโนโลยี FDM มีหลักการทำงานโดยการอัดฉีดวัสดุผ่านหัวฉีดให้ซ้อนทับกันทีละชั้นจนเสร็จสมบูรณ์ เทคนิคนี้จะทำให้ชิ้นงานมีความละเอียดน้อยกว่า 2 วิธีแรก แต่มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ตัวอย่างกระบวนการทำงานของเครื่องพิมพ์นี้แสดงดังรูปที่ 6 เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมผลิตสินค้าที่หลากหลาย ได้แก่ เครื่องประดับตกแต่ง อุตสาหกรรมการก่อสร้าง และอื่นๆ

เทคโนโลยีการพิมพ์ที่เป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง คือ เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM เนื่องจากการก่อสร้างไม่จำเป็นต้องใช้รายละเอียดของชิ้นงานที่มาก และเทคนิคนี้ทำให้ประหยัดเวลาในการก่อสร้าง และช่วยลดการใช้ไม้แบบ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าจึงใช้เทคโนโลยี แบบ FDM ในการสร้างชิ้นตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 6 กระบวนการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM (Olivera et al., 2016)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติในด้านการก่อสร้าง

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ส่งผลต่อเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ สามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

### 1. ปัจจัยของคุณสมบัติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เนื่องจากกระบวนการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ประกอบด้วยเครื่องปั๊มคอนกรีต สายฉีด หัวฉีด รางที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหัวฉีด และระบบตรวจจับ เป็นต้น สิ่งที่เป็นผลกระทบต่อเทคนิคการพิมพ์ คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่ของหัวฉีด เนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแข็งตัวของคอนกรีต จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีการศึกษาทดลองขั้นพื้นฐานเพื่อตรวจสอบความเร็วในของการเคลื่อนที่ของหัวฉีดในรูปแบบรอบการหมุนต่อนาที หรือ Revolutions per minute (RPM) ของสกรูในถังระบายคอนกรีตออก และและอัตราส่วนของกว้างต่อยาว (Aspect ratio) ที่แสดงถึงความยาวของ

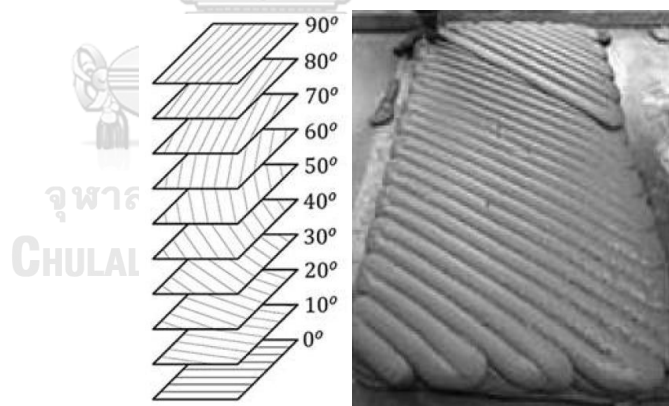
ผนังของโครงสร้าง (Park et al., 2019) รวมถึงขนาดของหัวฉีดที่ใช้เพราะจะส่งผลต่อชั้นความหนาของชั้นที่พิมพ์

## 2. คุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ปัจจุบันมีการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดและแรงดัดด้วยการใช้วัสดุประสานเป็นเส้นใยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของคอนกรีตในการทำงานร่วมกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และผลการทดสอบที่พบคือคอนกรีตมีส่วนความแข็งแรงเมื่อเทียบกับน้ำหนักประมาณร้อยละ 50 (Tay et al., 2022)

## 3. ลักษณะรูปทรง หรือรูปแบบการพิมพ์

การพิมพ์ในลักษณะที่มีทิศทางเดียวกันมักพบกับปัญหาเรื่องของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของคอนกรีตที่เชื่อมกันระหว่างชั้นที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลในด้านการรับแรงอัดและแรงดัดของคอนกรีต Pham et al. (2022) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของลักษณะการจัดเรียงชั้นคอนกรีตที่ซ้อนทับกันพบว่าเมื่อทำการปรับมุมมององศาของการพิมพ์แต่ละชั้นเริ่มต้นด้วยมุม 0 องศาในลักษณะการพิมพ์แนวราบและทำการเพิ่มมุมมององศาในชั้นถัดไปที่ละ 10 องศา จนกระทั่งถึง 90 องศาแสดงดังรูปที่ 7 และมีการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตด้วยการเพิ่มเส้นใยร้อยละ 0.75 ของปริมาตร พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงอัดและแรงดัดได้ดี



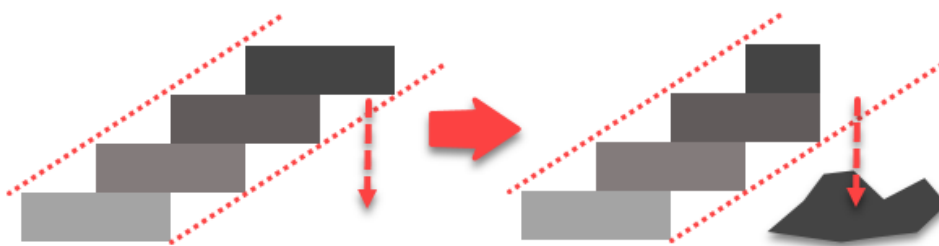
รูปที่ 7 ลักษณะการพิมพ์ที่ซ้อนทับกันของคอนกรีตด้วยการเพิ่มมุมมององศาในชั้นถัดไป 10 องศา (Pham et al., 2022)

## 4. ข้อจำกัดในการพิมพ์ 3 มิติ

การพิมพ์ 3 มิติที่มีลักษณะเป็นคานยื่นไม่สามารถขึ้นรูปได้เพราะว่าไม่มีฐานมารองรับแสดงดังรูปที่ 8 และการพิมพ์ลักษณะซ้อนทับเป็นชั้นบันไดที่มีความชันที่มากจะส่งผลต่อการพังทลายเนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีตแสดงรูปที่ 9



รูปที่ 8 ตัวอย่างข้อจำกัดของการพิมพ์ที่เป็นคานยื่น



รูปที่ 9 ตัวอย่างข้อจำกัดของการพิมพ์ที่แบบการซ้อนทับแบบขั้นบันได

### 2.3 วัสดุซีเมนต์ที่นำมาใช้กับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ในปัจจุบันโลกเผชิญปัญหาโลกร้อนอย่างหนัก และอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาโลกร้อน เพราะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เข้าสู่ชั้นบรรยากาศโลกคิดเป็นร้อยละ 5 ของการปล่อย  $\text{CO}_2$  ทั้งหมดที่เกิดจากกระบวนการเผาหินปูนและการใช้เชื้อเพลิงปริมาณสูง ซึ่งการลดการปล่อย  $\text{CO}_2$  สามารถทำได้โดยปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การใช้เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนต่ำ และการใช้ซีเมนต์ทางเลือก (Worrell et al., 2001) การศึกษางานวิจัยซีเมนต์ทางเลือกที่เกี่ยวข้อง และสามารถนำมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยปูนซีเมนต์เขียวสำหรับการพิมพ์ 3 มิติในอุตสาหกรรมก่อสร้างสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและความทนทานของวัสดุทำให้มีการสร้างมลพิษที่น้อยลงประมาณ 20 เท่า อีกทั้งยังช่วยในเรื่องของการประหยัดเวลา (Park et al., 2020) อีกทั้งการปรับปรุงมวลรวมหยาบที่เกิดจากการนำวัสดุที่ใช้แล้วนำมาบดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านเทคนิคการพ่นคอนกรีต (Shotcrete) พร้อมกับการใช้ระบบการพิมพ์ 3 มิติแบบ Particle-bed พบว่าสามารถลดปริมาตรของซีเมนต์ได้ร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับการใช้มอร์ตาร์ และสามารถรับแรงอัดได้ถึง 65 เมกกะปาสกาล เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีมวลรวมหยาบ (Mai et al., 2021)

การขึ้นรูปด้วยการพิมพ์มอร์ตาร์เป็นการทดลองเกี่ยวกับการแข็งตัวของซีเมนต์เพลส และการใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้น้ำยาปรับสภาพที่มีส่วนผสมของฟิตที่ผ่านการดัดแปลงด้วยอนุภาคนิวทริ (MT-600) โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ MT-600 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water-cement ratio,

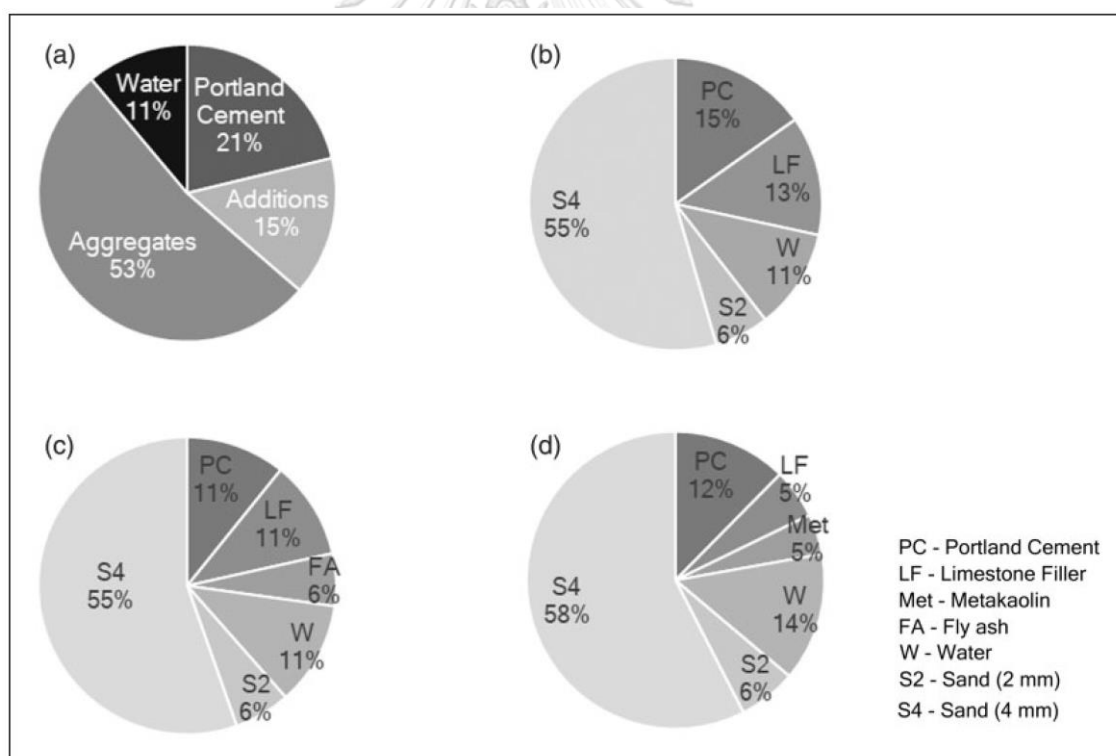
w/c) โดยตัวอย่างทดสอบจะแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าตัวอย่างที่ผสม MT-600 มีความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผสม MT-600 ในซีเมนต์ (Demyanenko et al., 2018) การพัฒนาส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ จะพบว่าส่วนผสมที่ใช้จะประกอบด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland cement) หินปูนที่ใช้เติมให้วัสดุอื่นๆ (Limestone filler) เมตาเกอลิน (Metakaolin) เป็นการปรับปรุงคุณภาพของดินขาว (Kaolin) ด้วยความร้อน เถ้าลอย (Fly ash) น้ำ (Water) และทรายละเอียดที่มีขนาด 2 มิลลิเมตรและ 4 มิลลิเมตร โดยมีตัวอย่างมอร์ตาร์แบ่งออกเป็น 4 สัดส่วนผสมที่มีค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ประมาณ 100 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 10 ได้แก่ (a) มอร์ตาร์ที่พัฒนาแล้ว (b) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย (c) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย (Fly ash) และ (d) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของ Metakaolin เมื่อนำตัวอย่าง(b) ตัวอย่าง(c) และตัวอย่าง(d) มาเปรียบเทียบกับตัวอย่าง(a) พบว่าตัวอย่าง (b) สามารถลดปริมาณซีเมนต์ได้ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ตัวอย่าง(c) สามารถลดลงได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และตัวอย่าง(d) สามารถลดลงได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แต่การเติม Metakaolin ได้ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ต่อการพิมพ์ขึ้นรูปวัตถุเพราะมีความต้องการน้ำที่สูง (Teixeira et al., 2021)

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและวัสดุซีเมนต์เพื่อหาอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดสูงเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และมีการใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยลดปริมาณการใช้น้ำและปูนซีเมนต์ โดยมีการคัดเลือกค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่พัฒนาในช่วง 40 ถึง 60 มิลลิเมตร และต้องมีกำลังรับแรงอัด 50 เมกกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังนั้นจะพบว่า มอร์ตาร์ W400-28-H01 ใช้ระยะเวลาการก่อตัว 90 นาที และมีกำลังอัดอยู่ที่ 50.42 เมกกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 7 วัน และมอร์ตาร์ W170-28-H01S5 ใช้ระยะเวลาการก่อตัว 94 นาที และมีกำลังอัดอยู่ที่ 51.23 เมกกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 7 วัน อีกทั้งระยะเวลาในการขึ้นรูปมีส่วนสำคัญต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์เพราะว่าต้องใช้เวลา 15 นาที มอร์ตาร์ชั้นล่างถึงจะสามารถรับน้ำหนักของชั้นถัดไปได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป 50 นาที พบว่า มอร์ตาร์ชั้นล่างที่มีการแข็งตัวจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้จุดความชื้นจากมอร์ตาร์ชั้นบนจะเกิดลักษณะรอยแตกกว้าง และถ้าเวลาผ่านไปจะเกิดรอยต่อเย็น (cold joint) ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง (ธัญญะสุขวนิชย์ et al., 2021)



ตารางที่ 1 การทดสอบแรงอัดของตัวอย่างที่ขึ้นกับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง (Demyanenko et al., 2018)

ส่วนผสม	MT-600 (% โดยน้ำหนัก ของปูนซีเมนต์)	อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน (w/c)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)		
			3 วัน	7 วัน	28 วัน
1	-	0.258	40.2	50.8	57.7
2	0.5	0.250	49.6 (+23%)	65.3 (+20%)	71.9 (+24%)
3	0.5	0.258	60.0 (+49%)	63.5 (+25%)	78.4 (+35%)
4	0.5	0.260	56.7 (+41%)	75.5 (+49%)	76.9 (+33%)
5	0.5	0.268	58.5 (+45%)	76.0 (+50%)	77.3 (+34%)



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบส่วนผสมของมอร์ตาร์ (a) มอร์ตาร์ที่พัฒนาแล้ว (b) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย (c) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย (Fly ash) และ (d) ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของ Metakaolin (Teixeira et al., 2021)

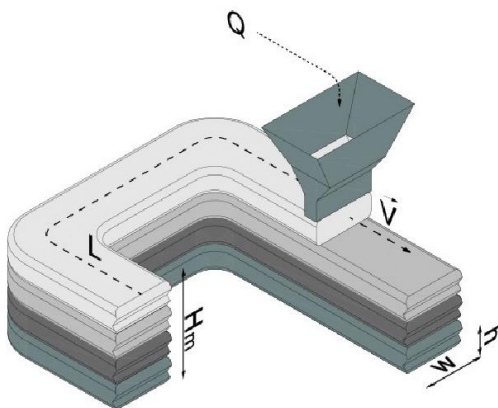


## 2.4 หลักการพิมพ์วัสดุขึ้นงานคอนกรีตด้วยเทคโนโลยี 3 มิติ แบบ FDM

แนวความคิดเกี่ยวกับการออกแบบและการก่อสร้างทางด้านสถาปัตยกรรมในปัจจุบันมีความหลากหลายมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นการทำผนังที่มีลวดลายที่สวยงามโดยใช้รูปทรงเรขาคณิต อีกทั้งยังสามารถออกแบบรูปแบบต่างๆ ที่สะดวกมากขึ้น โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบชิ้นงาน และสามารถนำข้อมูลดิจิทัลที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคำสั่งต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการเขียนคำสั่งและป้อนเข้าสู่เครื่องพิมพ์ 3 มิติได้

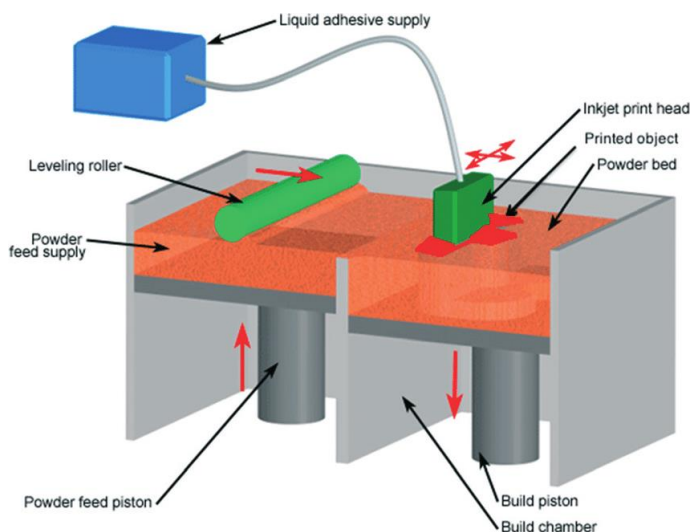
นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทของการพิมพ์ 3 มิติของวัสดุซีเมนต์ที่แพร่หลายในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ดังนี้

1. Extrusion Deposition มีหลักการทำงานของระบบคือการส่งออกคอนกรีตสดผ่านท่อลำเลียงไปที่หัวพิมพ์เพื่อฉีดคอนกรีตออกในรูปแบบของเส้นที่ซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ จนกระทั่งได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยลักษณะการขึ้นรูปของคอนกรีตด้วยระบบนี้จะแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ลักษณะการขึ้นรูปของคอนกรีตแบบ Extrusion Deposition (Wangler et al., 2016)

2. Powder Bed and Inkjet Head มีหลักการทำงานด้วยการพิมพ์แบบระบบผงวัสดุที่ใช้ผงปูนซีเมนต์หรือผงคอนกรีตจะถูกวางเป็นชั้นบางๆบนแท่นพิมพ์ หลังจากนั้นหัวพิมพ์จะพ่นสารเคมีหรือความร้อนในลักษณะของรูปแบบหยดหรือละอองเล็กๆ ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาในการแข็งตัวของคอนกรีตในแต่ละชั้น และเริ่มกระบวนการทำงานในชั้นถัดไปจนกระทั่งได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยลักษณะตัวอย่างการขึ้นรูปของระบบนี้จะแสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ลักษณะกระบวนการขึ้นรูปแบบ Powder Bed and Inkjet Head (Waheed et al., 2016)

กรณีศึกษาการออกแบบศาลาอเนกประสงค์ของรณท ศักดานรเศรษฐ์ พบว่าการออกแบบรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งที่ใช้วัสดุคอนกรีตเป็นอุปสรรคต่อการทำงาน ดังนั้นจึงมีการจำลองเหตุการณ์ผ่านโปรแกรม Rhinoceros 5.0 และใช้โปรแกรมศึกษาโครงสร้าง Autodesk Inventor โดยรูปแบบการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกเป็นลักษณะการพิมพ์แบบ Extrusion Deposition โครงสร้างคอนกรีตที่ใช้สามารถรับน้ำหนักได้ดี รวมทั้งแก้ไขปัญหาข้อจำกัดในการก่อสร้างคอนกรีตรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้ง และสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหล่อขึ้นรูปที่ใช้แม่พิมพ์เป็นซิลิโคน คิดเป็นร้อยละ 85 ของค่าใช้จ่ายในการหล่อขึ้นรูป และสามารถสรุปข้อดีและข้อจำกัดได้ดังตารางที่ 2 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 สรุปข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติด้วยวัสดุซีเมนต์ (นรเศรษฐ์ et al., 2015)

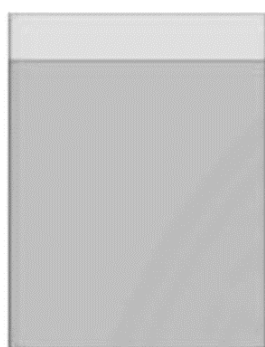
ข้อดี	ข้อจำกัด
1. เครื่องพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างแม่นยำ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรายละเอียดถูกต้องตามต้นแบบ	1. ความซับซ้อนของรูปทรงที่เครื่องพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สามารถขึ้นรูปได้ยังมีข้อจำกัด
2. เครื่องพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่ใช่รูปทรงตันได้ สามารถลดมวลและน้ำหนักของชิ้นงานให้เหลือเท่าที่จำเป็นได้ทำให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) ลดลง	2. ขนาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจะถูกจำกัดอยู่ภายใต้ขนาดของเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

ข้อดี	ข้อจำกัด
3. ไม่จำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นงาน เป็นการลดขยะจากการใช้แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูป	3. ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการจัดทำแบบสำหรับขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ และยังต้องมีการประเมินความเป็นไปได้เชิงโครงสร้างของชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป
4. ลดขั้นตอนการทำงานที่ต้องใช้แรงงานมนุษย์ ทำให้ใช้แรงงานในกระบวนการผลิตน้อยลง	4. ต้นทุนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ในปัจจุบันยังมีราคาสูงจึงทำให้ผู้บริโภคทั่วไปสามารถเข้าถึงได้ยาก

รูปแบบของหลักการพิมพ์เส้นคอนกรีตจะต้องมีการแปลงวัตถุดิบออกมาในลักษณะรูปแบบเป็นเส้นซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ เพื่อให้ได้รูปทรงเรขาคณิตที่มีความเหมาะสม ซึ่งการพิมพ์จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบ ดังนี้

1. เปลือก (Shell) คือ บริเวณรอบด้านนอกสุดของรูปทรง
2. ส่วนเติมเต็ม (Infill) คือ บริเวณรูปทรงด้านในของเปลือก

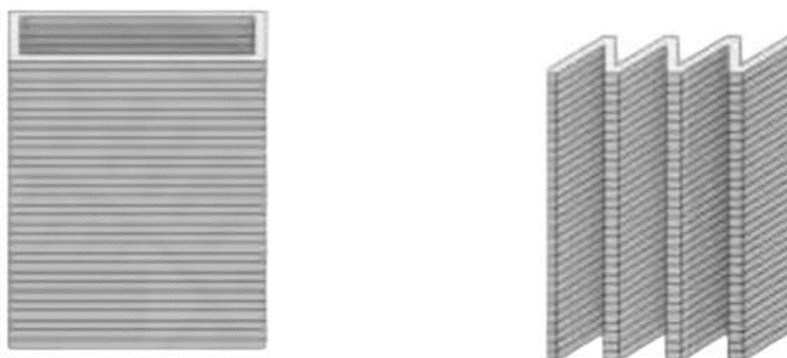
ทั้งนี้การออกแบบลักษณะของเปลือกและส่วนเติมเต็มจะส่งผลต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้าง โดยจะแปรผันตรงกับมวลในพื้นที่ถ้าตัดการรับน้ำหนัก และความแข็งแรงในการกระจายแรงของโครงสร้างตามตัวอย่างลักษณะรูปแบบของเปลือก (Shell) และส่วนเติมเต็ม (Infill) แสดงดังรูปที่ 13 แต่ข้อบกพร่องของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ไม่สามารถขึ้นรูปได้แบบคานยื่นโดยตรง จึงจำเป็นต้องมีค้ำยันเข้ามาช่วย



(a) รูปทรงตันแบบ



(b) รูปทรงตันแบบที่ถูกแปลงเพื่อการพิมพ์สามมิติแล้ว



(c) เปลือก (Shell) จากการพิมพ์สามมิติ

(d) ส่วนเติมเต็ม (Infill) จากการพิมพ์สามมิติ

รูปที่ 13 ลักษณะรูปแบบของเปลือก (Shell) และส่วนเติมเต็ม (Infill) (นรเศรษฐ์ et al., 2015)

## 2.5 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องคำนึงถึงแรงกระทำที่ประกอบด้วย แรงตามแนวแกน (Axial forces) แรงเฉือน (Shear forces) แรงดัด (Bending forces) และแรงบิด (Torsion forces) โดยการออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธี คือ วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design, WSD) วิธีกำลัง (Strength Design Method, SDM) และวิธีภาวะสุดขีด (Limit State Design, LSD) และวิธีการอิงสมรรถนะของโครงสร้าง (Performance-Based Design, PBD)

### 2.5.1 การออกแบบวิธี SDM

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบด้วยวิธี SDM โดยพิจารณาจากแรงกระทำต่อโครงสร้างที่ใช้ตัวคูณเพิ่มแรงกระทำจนกระทั่งเกิดการวิบัติหรือพังพอนดี กล่าวคือ แรงต้านทานที่ใช้ออกแบบ หรือกำลังที่ใช้ออกแบบ (Design strength) มากกว่าหรือเท่ากับแรงกระทำที่ทำการเพิ่มค่าแล้ว หรือกำลังที่ต้องการ (Required strength) และสามารถสรุปแรงกระทำต่างๆได้ดังนี้

แรงดัด	$M_n \geq M_u$
แรงเฉือน	$V_n \geq V_u$
แรงตามแนวแกน	$P_n \geq P_u$

การออกแบบน้ำหนักบรรทุกจะต้องพิจารณาหาน้ำหนักประลัย (U) ตามมาตรฐาน วสท. 011008-21 (2564) ที่แรงกระทำต่างๆ ที่เพิ่มค่าแล้ว ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load, D)

น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load, L) แรงลม (Wind Load, W) แรงแผ่นดินไหว (Earthquake Load, E) และแรงดันดินด้านข้าง และน้ำใต้ดิน สามารถสรุปสมการของน้ำหนักประลัยได้ดังนี้

1. อาคารที่ไม่มีผลกระทบจากแรงลม และแรงแผ่นดินไหว

$$U = 1.4D + 1.7L \quad (2.1)$$

2. อาคารที่มีผลกระทบจากแรงลม หรือแรงแผ่นดินไหว

$$U = 0.75(1.4D + 1.7L) + (1.3W \text{ หรือ } 1.0E) \quad (2.2)$$

3. อาคารที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกจร และมีผลกระทบจากแรงลม หรือแรงแผ่นดินไหว

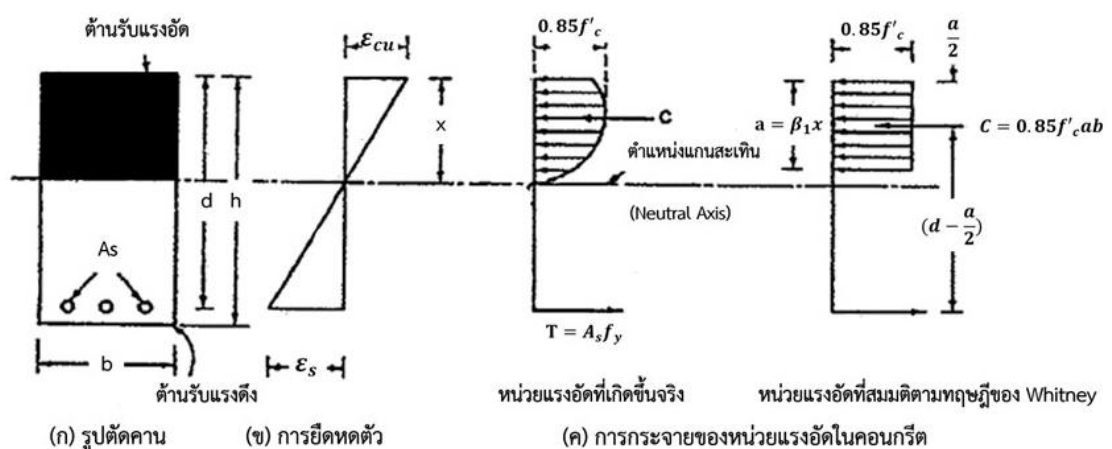
$$U = 0.9D + (1.3W \text{ หรือ } 1.0E) \quad (2.3)$$

4. อาคารที่มีผลกระทบจากแรงดันดินด้านข้าง และน้ำใต้ดิน

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.7H \quad (2.4)$$

#### 2.5.1.1 การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงดัด

เมื่อพิจารณาแรงดัดที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงอัดและแรงดึงปรากฏว่าค่าแรงเค้นและความเครียดจะเกิดพฤติกรรมแสดงดังรูปที่ 14 และใช้ทฤษฎี Whitney (Whitney Rectangular Stress Distribution) โดยมีสมมติฐานที่ว่าความเครียดของคอนกรีต ( $\epsilon_{cu}$ ) เท่ากับ 0.003 และความเครียดของเหล็กเสริม ( $\epsilon_s$ ) เท่ากับค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็ก ( $\epsilon_y$ ) เท่ากับกำลังครากที่กำหนดของเหล็กเสริม ( $f_y$ ) ทหารมอดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กเสริม ( $E_s$ ) และสมมติให้ค่าแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับแรงดึงของเหล็กเสริมเพื่อหาความสัมพันธ์ของสมการที่เกิดขึ้นในสภาวะความเครียดสมดุล ดังนั้นสามารถสรุปสมการที่เกี่ยวข้องในการออกแบบคานตามทฤษฎีดังกล่าวได้ดังนี้



รูปที่ 14 ลักษณะการเกิดแรงและหน่วยแรงในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงดัด

(1) การออกแบบคานสี่เหลี่ยมรับแรงดัดด้วยการเสริมเหล็กรับแรงดึง

(1.1) ปริมาณเหล็ก (Reinforcement Ratio,  $\rho$ )

การเสริมปริมาณเหล็กให้เหมาะสมกับหน้าตัดคานจะต้องเสริมเหล็กโดยมีเงื่อนไขที่ว่าปริมาณเหล็กเสริมที่ใส่จะต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด และไม่มากกว่าปริมาณเหล็กเสริมที่มากที่สุดจึงจะเหมาะสม

- ปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล ( $\rho_{balanced}$ )

$$\rho_{balanced} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $f'_c$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)  
 $f_y$  คือ กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (เมกะปาสคาล)

นอกจากนี้ค่า  $\beta_1 = 0.85$  จะใช้สำหรับคอนกรีตที่มี  $f'_c$  น้อยกว่าเท่ากับ 28 เมกะปาสคาล หรือถ้า  $f'_c$  มากกว่า 28 เมกะปาสคาล จะใช้  $\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7}$  แต่ต้องไม่น้อยกว่า 0.65

- ปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด ( $\rho_{min}$ )

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $f_y$  คือ กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (เมกะปาสคาล)

- ปริมาณเหล็กที่มากที่สุด ( $\rho_{max}$ )

$$\rho_{max} = 0.75\rho_{balanced} \quad (2.7)$$

- ปริมาณเหล็กเสริม ( $\rho$ )

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (ตารางมิลลิเมตร)  
 $b$  คือ ความกว้างคาน (มิลลิเมตร)  
 $d$  คือ ความลึกประสิทธิผลของคาน (มิลลิเมตร)

(1.2) ค่าแฟกเตอร์ต้านทานแรงดัด (Flexural Resistance Factor,  $R_n$ )

$$R_n = \rho f_y \left( 1 - \frac{1}{2} \rho m \right) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $m = \frac{f_y}{0.85 f'_c}$  และ  $\rho = \frac{A_s}{bd}$

$f'_c$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)

$f_y$  คือ กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม

(เมกกะปาสคาล)

(1.3) ค่ากำลังรับแรงดัดที่เกิดขึ้นในคาน

ค่ากำลังรับแรงดัดที่เกิดขึ้นในคานที่ใช้ออกแบบจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับกำลังรับแรงดัดประลัย ( $M_n \geq M_u$ )

- กำลังรับแรงดัดที่คานรับได้ ( $M_n$ )

$$M_n = R_n b d^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ  $R_n$  คือ ค่าแฟกเตอร์ต้านทานแรงดัด (เมกกะปาสคาล)

$b$  คือ ความกว้างคาน (มิลลิเมตร)

$d$  คือ ความลึกประสิทธิผลของคาน (มิลลิเมตร)

- กำลังรับแรงดัดประลัย ( $M_u$ )

การหาค่ากำลังรับแรงดัดประลัยจะขึ้นกับน้ำหนักประลัยของอาคารที่มีแรงกระทำต่างๆ ในกรณีนี้ขอยกตัวอย่างอาคารที่ไม่มีผลกระทบจากแรงลม และแรงแผ่นดินไหว ( $U = 1.4D + 1.7L$ ) และนำมาพิจารณาค่ากำลังดัดประลัยที่เกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้

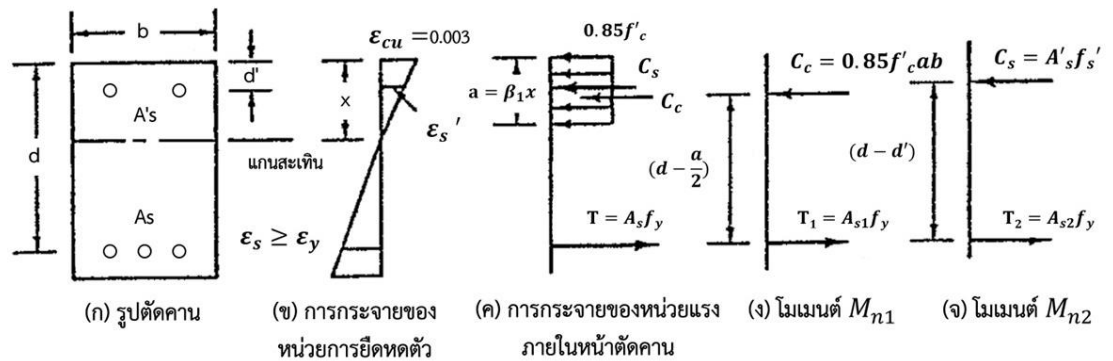
$$M_u = 1.4MD + 1.7ML \quad (2.11)$$

เมื่อ  $MD$  คือ โมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (นิวตัน·เมตร)

$ML$  คือ โมเมนต์ของน้ำหนักบรรทุกจร (นิวตัน·เมตร)

(2) การออกแบบคานสี่เหลี่ยมรับแรงดัดด้วยการเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมแรงดึงและแรงอัดจะพบว่าหน้าตัดของคานจะมีเหล็กเสริมด้านบนที่ทำหน้าที่รับแรงอัดแสดงดังรูปที่ 15 เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำต่อหน้าตัดคานต่างๆ สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้



**รูปที่ 15** ลักษณะการเกิดแรงและหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงอัดและแรงดึงภายใต้แรง

แรงดึงที่เกิดขึ้นในคาน ( $T$ ) = แรงดึงในเหล็กเสริม ( $T$ )

$$T = A_s f_y \quad (2.12)$$

แรงอัดที่เกิดขึ้นในคาน ( $C$ ) = แรงอัดในคอนกรีต ( $C_c$ ) + แรงอัดในเหล็กเสริม ( $C_s$ )

เมื่อ  $C_c = 0.85 f'_c ab$  (2.13)

$$C_s = A'_s f_y \quad (2.14)$$

$A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง (ตารางมิลลิเมตร)

$A'_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด (ตารางมิลลิเมตร)

ดังนั้นที่ระยะ  $a$  ดังรูปที่ 15 จะสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากแรงที่สภาวะสมดุลที่แรงดึงและแรงอัดมีค่าที่เท่ากัน

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} \quad (2.15)$$

จากรูปที่ 2.15 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ความเครียดส่วนของแรงอัดของเหล็กเสริมจะมีค่าดังสมการที่ 2.16

$$\varepsilon'_s = 0.003 \frac{(x - d')}{x} \quad (2.16)$$

แต่  $a = \beta_1 x$  ดังนั้น  $x = \frac{a}{\beta_1}$  แทนลงในสมการที่ 2.15

$$\varepsilon'_s = 0.003 \frac{(a - \beta_1 d')}{a} \quad (2.17)$$



กรณี 1 เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก  $f'_s = f_y$

$$\varepsilon'_s = 0.003 \frac{(a - \beta_1 d')}{a} \geq \frac{f_y}{E_s} \quad (2.18)$$

และเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก  $f_s = f_y$

$$\varepsilon'_s = 0.003 \frac{(a - \beta_1 d')}{a} \geq \frac{f_y}{E_s} \quad (2.19)$$

ถ้าข้อสมมติฐานตามสมการ 2.18 และ 2.19 ถูกต้อง ดังนั้นโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่พิจารณาจากแรง  $T$  จะปรากฏดังสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$M_n = 0.85 f'_c ab \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \quad (2.20)$$

หรือ

$$M_n = (A_s - A'_s) f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \quad (2.21)$$

กรณีที่ 2 เหล็กไม่ถึงจุดครากจะต้องทำการคำนวณค่า  $a$  ใหม่ตามสมการที่ 2.22 โดยพิจารณาแรงในเหล็กเสริม  $f_s$  และ  $f'_s$

$$a = \frac{A_s f_s - A'_s f'_s}{0.85 f'_c b} \quad (2.22)$$

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 15 เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมรับแรงอัดและแรงดึงสามารถสรุปได้ดังสมการที่ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ ดังนั้นสมการโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.25

ค่าหน่วยแรงของเหล็กเสริมรับแรงอัด

$$f'_s = \varepsilon'_s E_s = 0.03 \frac{(a - \beta_1 d')}{a} E_s \quad (2.23)$$

ค่าหน่วยแรงของเหล็กเสริมรับแรงดึง

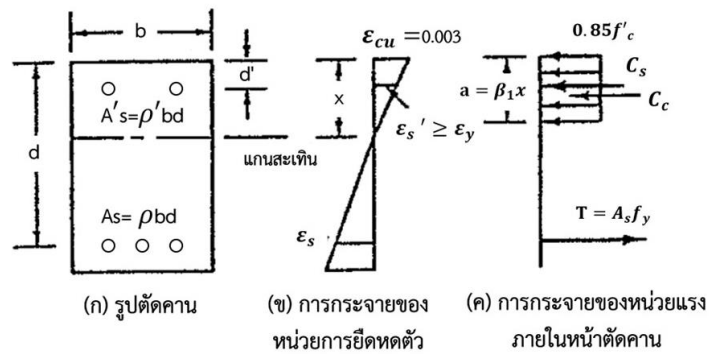
$$f_s = \varepsilon_s E_s = 0.03 \frac{(\beta_1 d - a)}{a} E_s \quad (2.24)$$

โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น

$$M_n = 0.85 f'_c ab \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \quad (2.25)$$

ค่าหน่วยเหล็กเสริมรับแรงอัดมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่จุดครากแสดงดังสมการที่ 2.26 และพฤติกรรมที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 16

$$\rho - \rho' \left( 1 - \frac{0.85 f'_c}{f_y} \right) \geq 0.85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) \quad (2.26)$$



### รูปที่ 16 สภาวะที่เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก

ถ้าสมการที่ 2.26 เป็นจริง ดังนั้นความเครียดที่เหล็กเสริมรับแรงอัดมากกว่าหรือเท่ากับแรงอัดที่จุดคราก ( $\epsilon'_s \geq \epsilon_y$ ) ดังนั้น

$$T = \rho b d f_y = A_s f_y \quad (2.27)$$

$$C_c = 0.85 f'_c \beta_1 x b \quad (2.28)$$

$$C_s = (f_y - 0.85 f'_c) \rho' b d \quad (2.29)$$

แรงกระทำที่สภาวะสมดุล  $T = C_c + C_s$  ดังนั้นจะหาความสัมพันธ์ค่า  $x$  ที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 2.30

$$x = \frac{f_y d}{0.85 \beta_1 f'_c} \left[ \rho - \rho' \left( 1 - \frac{0.85 f'_c}{f_y} \right) \right] \quad (2.30)$$

จากรูปที่ 16 (ข)  $\epsilon'_s = \frac{\epsilon_{cu}}{x} (x - d')$  แทนใน  $\epsilon'_s \geq \epsilon_y$  ปรากฏดังสมการที่ 2.31 ถึง 2.33

$$\frac{\epsilon_{cu}}{x} (x - d') \geq \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (2.31)$$

หรือ  $\frac{600}{x} (x - d') \geq f_y \quad (2.32)$

หรือ  $x \geq \frac{600 d'}{600 - f_y} \quad (2.33)$

แทนค่าสมการที่ 2.30 ลงในสมการที่ 2.33

$$\frac{f_y d}{0.85 \beta_1 f'_c} \left[ \rho - \rho' \left( 1 - \frac{0.85 f'_c}{f_y} \right) \right] \geq \frac{600 d'}{600 - f_y} \quad (2.34)$$

หรือ

$$\rho - \rho' \left( 1 - \frac{0.85 f'_c}{f_y} \right) \geq 0.85 \beta_1 \left( \frac{f'_c d'}{f_y d} \right) \left( \frac{600 d'}{600 - f_y} \right) \quad (2.35)$$

เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตามกรณีทีกล่าวข้างต้นที่ใช้ออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และค่าที่ได้จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับกำลังรับแรงดัดประลัยที่เกิดขึ้น ( $\phi M_n \geq M_u$ )

### (3) การออกแบบคานรับแรงเฉือน

การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงดัด (Flexure) และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในลักษณะแรงดึงทแยง (Diagonal Tension) โดยนิยมออกแบบเหล็กรับแรงเฉือนที่เป็นเหล็กผูกตั้ง (Stirrup) และเหล็กค่อม (Inclined Bar) และการออกแบบหน้าตัดคานให้รับแรงดัดเป็นไปในหลักเกณฑ์

$$V_n \geq V_u \quad (2.36)$$

#### (3.1) หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ( $V_n$ )

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.37)$$

$V_c$  คือ หน่วยแรงเฉือนของคอนกรีต (เมกกะปาสกาล)

$V_s$  คือ หน่วยแรงเฉือนของเหล็กเสริม (เมกกะปาสกาล)

หน่วยแรงเฉือนของคอนกรีตรับได้ ( $V_c$ )

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} \quad (2.38)$$

หรือการคำนวณหน่วยแรงเฉือนอย่างละเอียด

$$V_c = \left( 0.16 \sqrt{f'_c} + \frac{17 \rho_w V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.29 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.39)$$

เมื่อ  $b_w$  คือ ความกว้างของเอวคาน (มิลลิเมตร)

$d$  คือ ความลึกประสิทธิผลของคาน (มิลลิเมตร)

$\rho_w$  คือ อัตราส่วนของ  $\frac{A_s}{b_w d}$

$f'_c$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกกะปาสกาล)

$V_u$  คือ หน่วยแรงเฉือนประลัย (เมกกะปาสกาล)

$M_u$  คือ กำลังรับแรงดัดประลัย (นิวตัน-เมตร)

หน่วยแรงเฉือนของเหล็กเสริม ( $V_s$ ) สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 เหล็กถูกตั้งที่ตั้งฉากกับแนวแกนขององค์อาคาร

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (2.40)$$

กรณีที่ 2 เหล็กถูกตั้งเอียงเสริมรับแรงเฉือน

$$V_s = \frac{A_v f_y d (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s} \quad (2.41)$$

เมื่อ	$V_s$	คือ	แรงเฉือนที่เหล็กรับแรงเฉือน (นิวตัน)
	$A_v$	คือ	พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงเฉือนภายในระยะเรียง (ตารางมิลลิเมตร)
	$f_y$	คือ	กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (เมกกะปาสคาล)
	$d$	คือ	ความลึกประสิทธิผลของคาน (มิลลิเมตร)
	$s$	คือ	ระยะห่างของเหล็กเสริม (มิลลิเมตร)
	$\alpha$	คือ	มุมเอียงของเหล็กคอกม้า (องศา)

(3.2) หน่วยแรงเฉือนประลัย ( $V_u$ )

$$V_u = \frac{V}{b_w d} \quad (2.42)$$

เมื่อ	$V$	คือ	แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงในคาน (นิวตัน)
	$b_w$	คือ	ความกว้างของเอวคาน (มิลลิเมตร)
	$d$	คือ	ความลึกประสิทธิผลของคาน (มิลลิเมตร)

(3.3) แรงเฉือนประลัยของคานลิก ( $V_u$ )

การคำนวณหน่วยแรงเฉือนประลัยของคานลิกมีข้อกำหนดของวสท.011008-21 (2564) เกี่ยวกับองค์อาคารที่มี  $l_n$  ไม่เกิน 4h หรือบริเวณของคานที่น้ำหนักรรทุกกระทำเป็นจุดอยู่ห่างจากที่รองรับไม่เกิน 2h จากที่รองรับ ซึ่งรับน้ำหนักรรทุกด้านหนึ่งและมีที่รองรับอยู่ด้านตรงข้ามโดยที่แนวแรงอัดในลักษณะค้ำยันสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างน้ำหนักรรทุกและที่รองรับ และการออกแบบสัดส่วนของคานลิกเป็นไปตามข้อกำหนดของสมการ 2.43

$$V_u \leq 0.83 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.43)$$

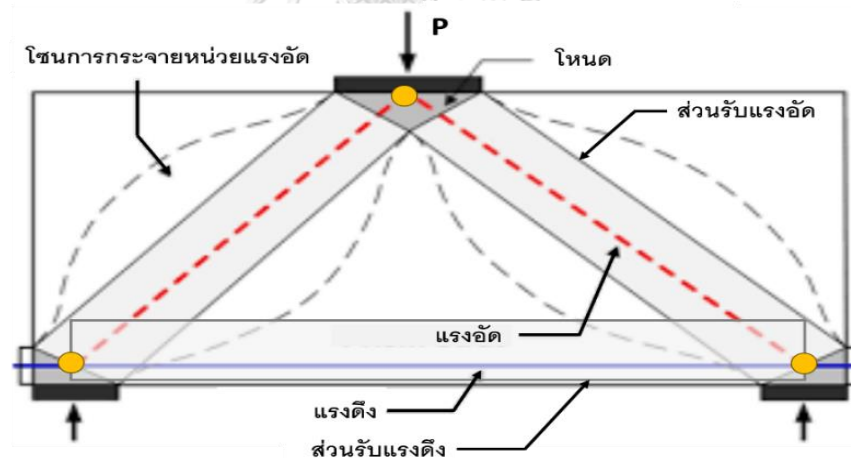
เมื่อ	$f'_c$	คือ	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)
	$b_w$	คือ	ความกว้างของเอวคาน (มิลลิเมตร)

$d$  คือ ความลึกประสิทธิผลของคาน (มิลลิเมตร)

คานลึกจะต้องเสริมเหล็กทั้งสองข้างขององค์อาคารลึกไม่น้อยกว่าข้อกำหนดดังต่อไปนี้ (1) เนื้อที่ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ตั้งฉากกับแนวแกนตามยาวของคาน  $A_v$  ต้องไม่น้อยกว่า  $0.0025b_w s$  และ  $s$  ต้องไม่เกิน  $d/5$  แต่ทั้งนี้ต้องไม่เกิน 300 มิลลิเมตร และ (2) เนื้อที่ของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ขนานกับแนวแกนตามยาวของคาน  $A_{v2}$  ต้องไม่น้อยกว่า  $0.0025b_w s_2$  และ  $s_2$  ต้องไม่เกิน  $d/5$  แต่ทั้งนี้ต้องไม่เกิน 300 มิลลิเมตร

### 2.5.2 การจำลองแบบแรงอัด-แรงดึง (Strut and Tie Model)

แบบจำลองนี้เป็นการจำลองพฤติกรรมของแรงภายในโครงสร้างคอนกรีตให้เป็นหน่วยแรงอัด-แรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยนำหลักการของทฤษฎีโครงข้อหมุนหรือโครงถัก (Truss) มาประยุกต์ใช้ เมื่อพิจารณาออกแบบชิ้นส่วนของโครงสร้างจะใช้ทฤษฎีอิลาสติก (Elastic theory) เพื่อให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพและสามารถกำหนดรูปแบบของการจำลองได้ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น ระบายความเครียด หน่วยแรงดึงหลัก ทิศทางหลักที่เกิด และพลังงานสะสม เป็นต้น นอกจากนี้การวิเคราะห์แบบจำลองแรงอัด-แรงดึงมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 17 องค์ประกอบในแบบจำลองแรงอัด-แรงดึง

ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตโดยใช้แบบจำลองแรงอัด-แรงดึงมีขั้นตอนดังนี้

(1) การวิเคราะห์แบบจำลองแรงอัด-แรงดึงจำเป็นต้องวิเคราะห์โครงสร้างและออกแบบควบคู่กันไป โดยมีลำดับดังต่อไปนี้

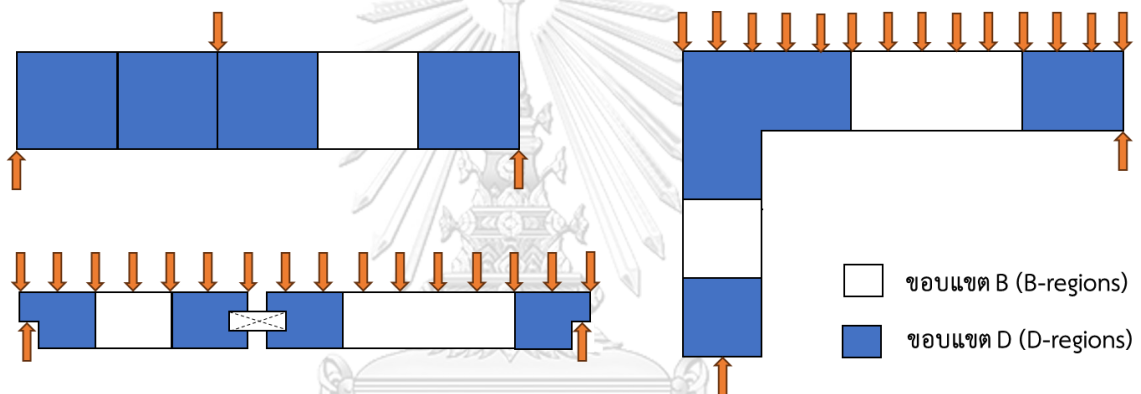
(1.1) วิเคราะห์โครงสร้างทั้งหมด (Overall Structural Analysis) คือ เพื่อหาแรงปฏิกิริยาหรือแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของโครงสร้างนั้น

(1.2) สร้างแบบจำลอง (Modeling) เพื่อจำลองหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปแบบจำลองแรงอัดและแรงดึงที่ทำให้เกิดสมดุลของแรงกระทำนั้นๆ

(1.3) ออกแบบขนาดหน้าตัด (Dimensioning) เพื่อประกอบการตัดสินใจในการหาลำดับด้านของคอนกรีต การขนาด และปริมาณของเหล็กเสริม

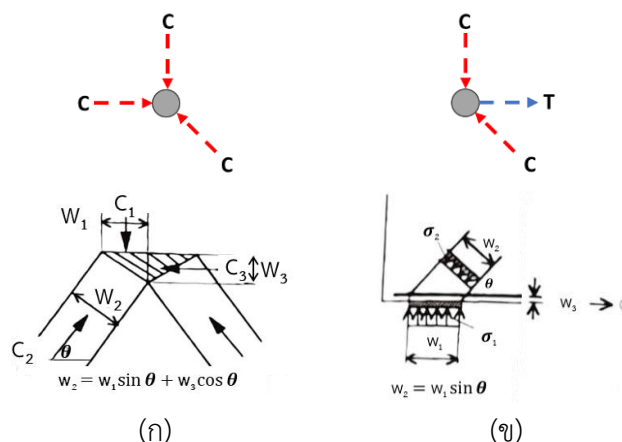
(1.4) เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็ก (Detailing) โดยพิจารณาการจัดเรียงระยะเหล็กเสริม และการยึดรั้งให้สอดคล้องกับแบบจำลองที่ออกแบบไว้

(2) แบ่งขอบเขต B (B-regions) และขอบเขต D (D-regions) โดยความหมายของ B-regions คือ บริเวณพื้นที่ของโครงสร้างที่มีการกระจายความเครียดเป็นไปตามข้อสมมติฐานของเบอร์นูลลี และ D-regions คือ บริเวณพื้นที่ของโครงสร้างที่มีการกระจายความเครียดไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear strain) ดังนั้นแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 บริเวณ B-regions และ D-regions

(3) จุดเชื่อมหรือโหนด (Node) ของแรงอัดหรือแรงดึงสามารถแบ่งออกได้ 4 รูปแบบ ได้แก่ โหนดแรงอัด-แรงอัด-แรงอัด (CCC-Node) โหนดแรงอัด-แรงอัด-แรงดึง (CCT-Node) โหนดแรงอัด-แรงดึง-แรงดึง (CTT-Node) และโหนดแรงดึง-แรงดึง-แรงดึง (TTT-Node) ดังแสดงในรูปที่ 19





**รูปที่ 19** ลักษณะจุดเชื่อมต่อต่างๆ ของแบบจำลองแรงอัด-แรงดึง

การคำนวณหาค่ากำลังจุดเชื่อมต่อ ( $F_m$ ) ตามมาตรฐาน ACI 318-19 (2019) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.44

$$F_m = f_{ce} A_n \quad (2.44)$$

เมื่อ  $A_n$  คือ พื้นที่ของจุดเชื่อมต่อที่ตั้งฉากกับส่วนรับแรงอัดหรือส่วนรับแรงดึง  
 $f_{ce}$  คือ กำลังรับแรงอัดประสิทธิภาพของจุดเชื่อมต่อหรือโหนด (เมกกะปาสคาล)

$$\text{โดยที่ } f_{ce} = 0.85 \beta_n f'_c \quad (2.45)$$

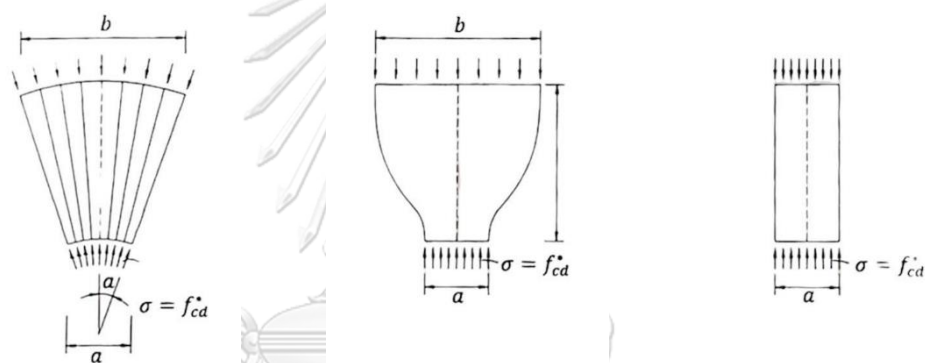
เมื่อ  $f'_c$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)  
 $\beta_n$  คือ ตัวคูณระดับความยุ่งเหยิง (Degree of disruption) ของจุดเชื่อมต่อ  
 โดยพิจารณาได้จากตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า  $\beta_n$  และ  $\beta_s$  สำหรับโหนดและส่วนรับแรงอัด

รายละเอียด	ค่า $\beta_n$ หรือ $\beta_s$
1. โหนด: ค่า $\beta_n$	
1.1 รับแรงอัดเพียงอย่างเดียว (CCC-Node)	1.00
1.2 รับแรงดึง 1 แนว (CCT-Node)	0.80
1.3 รับแรงดึงมากกว่าหรือเท่ากับ 2 แนว (CTT-Node และ TTT-Node)	0.60
2. ส่วนรับแรงอัด: ค่า $\beta_s$	
2.1 ส่วนรับแรงอัดที่มีหน้าตัดคงที่	1.00
2.2 ส่วนรับแรงอัดที่กลางช่วงมากกว่าปลาย	
2.2.1 เสริมเหล็กแนวขวางตามข้อกำหนด	0.75
2.2.2 ไม่เสริมเหล็กแนวขวางตามข้อกำหนด	0.60
2.3 ส่วนรับแรงอัดในองค์อาคารแรงดึงหรือปีกรับแรงดึงขององค์อาคาร	0.40
2.4 ในกรณีอื่น	0.60

(4) ส่วนแรงอัด-แรงดึง โดยจะพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

(4.1) ส่วนรับแรงอัด (Compressive Strut) คือ การสมมติชิ้นส่วนของคอนกรีตที่แทนด้วยหน่วยแรงอัดภายในที่มีลักษณะทิศทางที่พุ่งเป็นแนวตรงระหว่างจุดเชื่อมสองหรือสามจุด โดยส่วนรับแรงอัดที่มีความกว้างและความหนาที่จำกัดขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโครงสร้างและรูปแบบที่จำลอง ขนาดจุดรองรับ และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งลักษณะรูปแบบทั่วไปของส่วนรับแรงอัดสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปพัด รูปคอขวด และรูปปริซึม และมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 20 นอกจากนี้สามารถคำนวณขนาดของส่วนรับแรงอัดได้ดังที่แสดงในรูปที่ 21 โดยองค์ประกอบที่สำคัญที่ต้องทราบก่อนหาขนาดของส่วนรับแรงอัดและใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต ได้แก่ รูปร่างของแบบจำลองมุมเอียง ( $\theta$ ) ระยะแขนของแรง ( $Z$ ) ขนาดของแรงอัด ความกว้างของการเรียงเหล็กเสริม ขนาดของแป้นยึดรั้ง และขนาดของแป้นรองรับ เป็นต้น

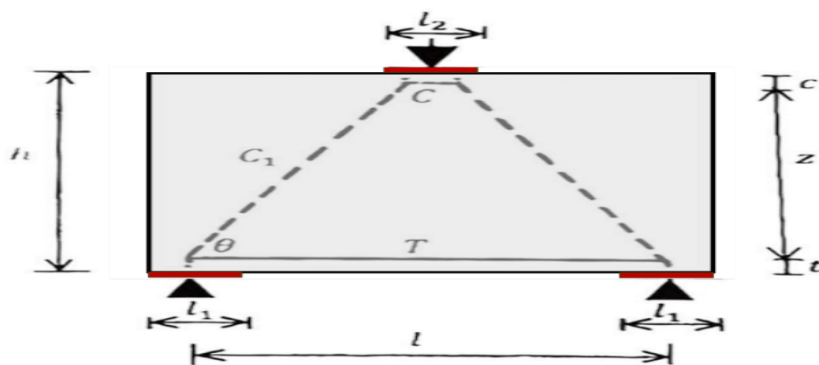


(ก) รูปพัด

(ข) รูปคอขวด

(ค) รูปปริซึม

รูปที่ 20 ลักษณะรูปแบบทั่วไปของส่วนรับแรงอัด (ลิ้มสุวรรณ, 2565)



รูปที่ 21 ตัวอย่างการจำลองพฤติกรรมแรงภายในโครงสร้างคอนกรีต



กำลังของส่วนรับแรงอัด ( $F_{ns}$ ) เกิดจากผลคูณระหว่างพื้นที่ส่วนรับแรงอัดกับกำลังรับแรงอัด ประสิทธิภาพแสดงดังสมการที่ 2.46

$$F_{ns} = f_{ce} A_c \quad (2.46)$$

เมื่อ  $A_c$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)  
 $f_{ce}$  คือ ตัวคูณระดับความยุ่งเหยิง (Degree of disruption) ของจุดเชื่อม โดยพิจารณาได้

$$\text{โดยที่} \quad f_{cd} = 0.85 \beta_s f'_c \quad (2.47)$$

$f'_c$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกกะปาสคาล)  
 $\beta_s$  คือ ตัวคูณกำลังรับแรงอัดประสิทธิภาพของส่วนรับแรงอัดที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของส่วนรับแรงอัดและการเสริมเหล็กโดยจะพิจารณาได้จาก

### ตารางที่ 3

(4.2) ส่วนรับแรงดึง (Tension Tie) คือ บริเวณเหล็กเสริมที่เป็นส่วนรับแรงดึงซึ่งอยู่ตำแหน่งขนานหรือแนวเดียวกับส่วนรับแรงดึง ดังนั้นในการออกแบบเหล็กเสริมจำเป็นต้องทำการคำนวณแรงดึงที่เกิดขึ้นในส่วนรับแรงดึงก่อน และสิ่งที่สำคัญมากที่สุดจะอยู่ในส่วนของการยึดรั้งเหล็กเสริมที่บริเวณจุดเชื่อม ได้แก่ การจัดเรียงเหล็กที่ดีและการจัดระยะฝังที่ทำให้เกิดการรั้งได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้การกำหนดขนาดจุดเชื่อมเป็นอีกหนึ่งสิ่งที่สำคัญมากกว่าขนาดของเหล็กเสริม เนื่องจากขนาดของเหล็กเสริมไม่มีผลโดยตรงต่อแบบจำลองแรงอัด-แรงดึง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาส่วนของแรงดึงเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณพื้นที่ของจุดเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 19 แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณนี้จะพิจารณาเพียงแรงดึงของเหล็กเสริมเท่านั้น

กำลังของส่วนรับแรงดึง ( $F_{nt}$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.48

$$F_{nt} = A_{st} f_y + A_{ps} (f_{pe} + \Delta f_p) \quad (2.48)$$

เมื่อ  $A_{st}$  คือ พื้นที่ของเหล็กเสริมรับแรงดึง (ตารางมิลลิเมตร)  
 $A_{ps}$  คือ พื้นที่ของลวดอัดแรง (ตารางมิลลิเมตร)  
 $f_y$  คือ กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (เมกกะปาสคาล)  
 $f_{pe}$  คือ กำลังดึงประสิทธิภาพของลวดอัดแรง (เมกกะปาสคาล)  
 $\Delta f_p$  คือ กำลังรับแรงดึงของลวดอัดแรงที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (เมกกะปาสคาล)

จากสมการที่ 2.48 กรณีที่โครงสร้างเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก เทอมที่สองของสมการจะไม่ถูกนำมาคำนวณ และกรณีที่มีลวดอัดแรงค่าของพจน์ ( $f_{pe} + \Delta f_p$ ) จะต้องมีค่าไม่มากกว่ากำลังที่จุดครากของลวดอัดแรง ( $f_{py}$ )

นอกจากนี้งานวิจัยของ Nagarajan and Pillai (2008) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์และการออกแบบคานลิกอย่างง่ายโดยใช้วิธีแรงอัดและแรงดึง (Strut and Tie Method) เพื่อหาสมการอย่างง่ายในการหาพื้นที่ของเหล็กเสริมที่จำเป็นสำหรับคานลิกที่มีลักษณะการวิบัติที่สมดุลและหาความแข็งแรงสูงสุดของคานลิกที่สามารถรับแรงกระทำได้ในกรณีของการวิบัติแตกต่างกัน รวมถึงการเปรียบเทียบสมการเหล่านี้กับผลลัพธ์จากการทดสอบ ซึ่งสามารถคาดการณ์ความสามารถในการรับแรงกระทำของคานลิก โดยสรุปได้ดังสมการต่อไปนี้

- ความสามารถในการรับน้ำหนักสำหรับการวิบัติของคานลิกที่จุดรองรับอย่างง่ายโดยการดัดงอ

$$T = 0.87 f_y A_{st} \quad (2.49)$$

เมื่อ  $A_{st}$  คือ พื้นที่ของเหล็กเสริมรับแรงดึง (ตารางมิลลิเมตร)  
 $f_y$  คือ กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (เมกะปาสคาล)

$$R = T \tan \theta \quad (2.50)$$

เมื่อ  $T$  คือ แรงดึง (นิวตัน)  
 $\theta$  คือ มุมระหว่างแรงอัดและแรงดึง (องศา)

ความสามารถสูงสุดสำหรับการวิบัติของคานลิกที่จุดรองรับอย่างง่ายที่โดยแรงเฉือน

$$C = 0.45 f_c \beta_s W_s b \quad (2.51)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังอัดที่ของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)  
 $\beta_s$  คือ ตัวคูณกำลังรับแรงอัดประสิทธิผลของส่วนรับแรงอัดที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของส่วนรับแรงอัดและการเสริมเหล็กโดยจะพิจารณาได้จาก

### ตารางที่ 3

$w_s$  คือ ความกว้างของแรงอัดสามารถคำนวณได้จาก  
 $W_s = W_t \cos \theta + L_B \sin \theta$  โดยที่  $W_t$  คือ ความกว้างของแรงดึง  
 คำนวณได้จาก  $W_t = \frac{(d-h)}{0.9}$  โดยที่  $d$  คือความลึกของหน้าตัดคาน และ  $h$  คือระยะห่างระหว่างเหล็กรับแรงอัดและแรงดึง  $L_B$  คือ ความกว้างของแผ่นเหล็กที่จุดรองรับ และมุมระหว่างแรงอัดและแรงดึง  
 $b$  คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน (มิลลิเมตร)

$$R = C \sin \theta \quad (2.52)$$

เมื่อ  $C$  คือ แรงอัด (นิวตัน)  
 $\theta$  คือ มุมระหว่างแรงอัดและแรงดึง (องศา)

## 2.6 ลักษณะการแตกร้าวในคานคอนกรีต

### 2.6.1 คานคอนกรีต

ลักษณะการแตกร้าวในคานคอนกรีตสามารถจำแนกออกเป็น 5 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

#### (1) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงดัด

เนื่องจากคานรับน้ำหนักที่มากกว่าที่ออกแบบไว้จึงส่งผลให้คานเกิดการโก่งตัวบริเวณกึ่งกลางจนกระทั่งเกิดรอยร้าวที่ด้านล่างของคานดังแสดงในรูปที่ 22(ก) นอกจากนี้การวิบัติแบบแรงดัด (Flexural failure) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อคานสามารถรับแรงเฉือนได้มากกว่าแรงดัดที่เกิดขึ้น โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่

(1.1) การวิบัติของแรงดัดที่เกิดจากแรงดึง (Flexural tension failure) เกิดจากการที่เหล็กรับแรงดึงจนไม่สามารถคืนสภาพได้ จึงทำให้บริเวณที่รับแรงอัดเกิดการแตกหัก โดยรอยร้าวจะเกิดบนคานบริเวณที่รับแรงดึง จากนั้นรอยร้าวจะพัฒนาในแนวตั้งไปยังบริเวณที่รับแรงอัดซึ่งมักจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของคาน

(1.2) การวิบัติของแรงดัดที่เกิดจากแรงอัด (Flexural compression failure) เกิดจากบริเวณคานที่รับแรงอัดมีการแตกหักของคอนกรีต จึงทำให้เหล็กรับแรงดึงรับแรงจนกระทั่งไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้ โดยรอยร้าวจะเกิดขึ้นอย่างกะทันหัน

(1.3) การวิบัติของแรงดัดที่เกิดจากแรงดึงและแรงอัดเท่ากัน (Balanced Failure) เกิดขึ้นเมื่อปริมาณเสริมเหล็กในคานเท่ากับอัตราส่วนการเสริมแรงที่สมดุล

#### (2) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงเฉือน

เนื่องจากคานรับน้ำหนักมากเกินกว่าที่ออกแบบไว้จึงส่งผลให้บริเวณจุดรองรับน้ำหนักของคานเกิดรอยร้าวที่ทำมุมประมาณ 45 องศา กับแนวตั้ง และมีความยาวตลอดความลึกของคาน ดังแสดงในรูปที่ 22(ข) นอกจากนี้การวิบัติแบบแรงเฉือน (Shear failure) จะเกิดขึ้นเมื่อคานมีความต้านทานแรงเฉือนน้อยกว่าแรงดัด โดยการออกแบบทั่วไปจะนิยมใส่เหล็กปลอก (Stirrups) ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติดังกล่าว โดยการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะ ดังต่อไปนี้

(2.1) การวิบัติของแรงดึงในแนวทแยง (Diagonal tension failure) เกิดจากการรอยร้าวที่พัฒนาจากแรงดัดที่บริเวณด้านล่างที่กึ่งกลางคาน และเมื่อมีแรงมากระทำมากขึ้น รอยร้าวนี้จะเพิ่มขึ้นในด้านความกว้างและความยาว และโค้งงอในแนวทแยง หลังจากนั้นคอนกรีตจะแตกหักอย่างกะทันหัน การวิบัตินี้มักจะพบในคานที่มีการเสริมแรงของเหล็กปลอกน้อย หรือมักจะพบในคานที่มีอัตราส่วนระหว่างช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ( $a/d$ ) มากกว่า 2.0 แต่บางครั้งก็เกิดขึ้นได้ใน  $a/d$  ที่น้อยกว่า 2.0

(2.2) การวิบัติของแรงเฉือนที่เกิดจากแรงอัด (Shear compression failure) เกิดจากการพัฒนาของรอยร้าวในหน้าตัดคาน และแพร่กระจายไปในส่วนที่รับแรงอัดของคานจนกระทั่งคานเกิดการแตกหักเมื่อคอนกรีตไม่สามารถรับแรงอัดได้ หรือมักจะพบในคานที่มีอัตราส่วนระหว่างช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ( $a/d$ ) น้อยกว่า 4.0

(2.3) การวิบัติแบบแยกส่วนที่เกิดจากแรงเฉือน หรือ แรงเฉือนจริง (Splitting shear failure) เมื่ออัตราส่วนระหว่างช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ( $a/d$ ) น้อยกว่า 1.0 โดยทั่วไปมักจะเกิดขึ้นกับคานเล็ก เมื่อแรงกระทำถูกถ่ายโอนไปยังส่วนที่รองรับโดยตรงจะทำให้เกิดแรงเฉือนมากกว่าแรงดัดที่เกิดขึ้นในคานปกติ และบางครั้งจะเกิดการวิบัติของแรงเฉือนที่เกิดจากแรงอัดบริเวณพื้นที่ที่อยู่ติดกับส่วนรองรับแทนที่จะเกิดการวิบัติแบบแยกส่วนที่เกิดจากแรงเฉือน

(2.4) การวิบัติของการยึดติด (Anchorage failure) การแยกส่วนของคอนกรีตตามแนวเหล็กเสริมตามยาวก่อนที่จะเกิดการวิบัติแบบอัด เนื่องจากรอยแตกร้าวขนาดเล็กในแนวทแยงที่เกิดจากการเสริมแรงหลักไม่ได้ถูกยึดอย่างเพียงพอ

(3) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากการทรุดตัวต่างระดับของเสาหรือฐานราก

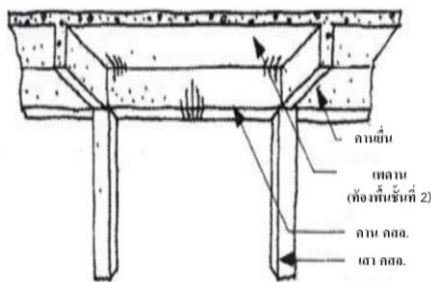
เนื่องจากการทรุดตัวที่ต่างระดับกันทำให้คานรับแรงดัดมากเกินไปที่ออกแบบไว้จึงส่งผลให้เกิดรอยร้าวในแนวตั้งหรือเอียงทำมุมกับแนวตั้งไม่เกิน 45 องศา แสดงรูปที่ 22(ค)

(4) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงบิด

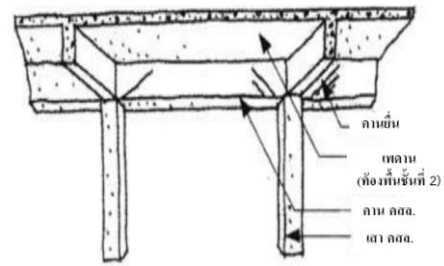
การแตกร้าวลักษณะนี้มักไม่เกิดให้เห็น หากเกิดจะมีลักษณะคล้ายกับการแตกร้าวที่เกิดจากแรงเฉือน แต่การแตกร้าวจากแรงบิดจะทำให้เกิดรอยร้าวเล็กๆ เป็นเส้นขนานจำนวนมากแสดงรูปที่ 22(ง)

(5) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากเหล็กเสริมเป็นสนิม

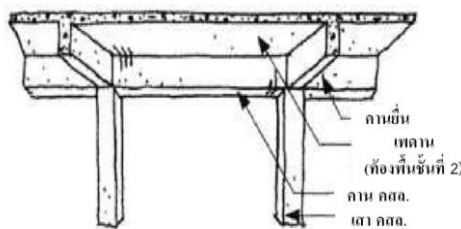
การแตกร้าวลักษณะนี้เกิดจากเหล็กเสริมเป็นสนิมบวมตันทำให้คอนกรีตที่หุ้มอยู่แตกออก โดยรอยร้าวจะเกิดเป็นแนวราบยาวขนานกับเหล็กเสริมมักจะพบที่ใต้คานหรือขอบด้านล่างของคาน แสดงรูปที่ 2.20(จ)



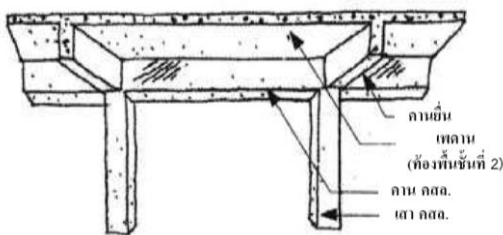
(ก) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงดัด



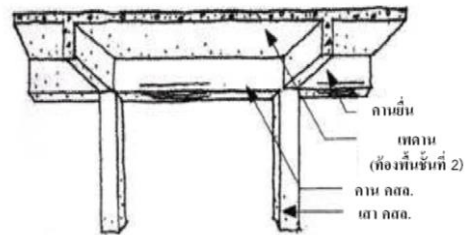
(ข) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงเฉือน



(ค) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากการทรุดตัวต่างระดับของเสาหรือฐานราก



(ง) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงบิด



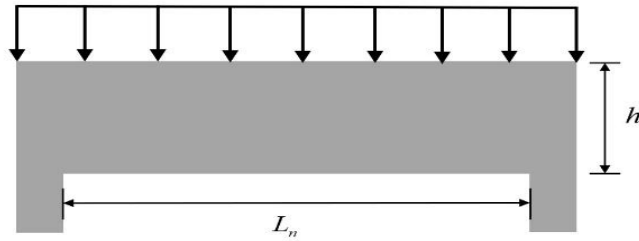
(จ) การแตกร้าวของคานที่เกิดจากเหล็กเสริมเป็นสนิม

### รูปที่ 22 ลักษณะการแตกร้าวในคานคอนกรีต

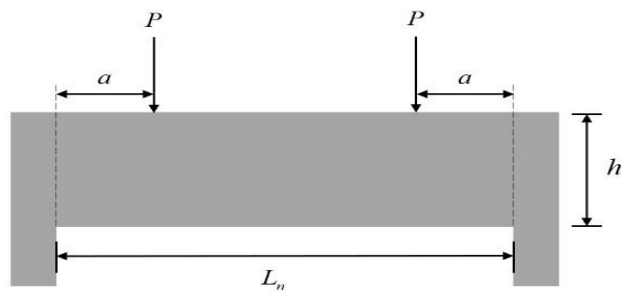
#### 2.6.2 คานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานลิกเป็นโครงสร้างมีสัดส่วนความยาวและความลึกที่ใกล้เคียงกัน และมีความหนาที่มีค่าน้อย เมื่อพิจารณาตามทฤษฎีความเค้นในระนาบตามมาตรฐาน ACI 318-19 (2019) ได้กำหนดอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความลึก ( $l_n/h$ ) น้อยกว่า 5 และสัดส่วนของอัตราส่วนระหว่างช่วงการเฉือนต่อความลึก ( $a/h$ ) น้อยกว่า 2 ดังแสดงในรูปที่ 23 โดยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในก่อนเกิดการแตกร้าวสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีอิลาสติก นอกจากนี้พบว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear behavior) เมื่อคานได้รับแรงกระทำ ปัจจุบันได้นำวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) และแบบจำลองโครงสร้างระบบแรงอัดและแรงดึง (Strut-Tie Structures

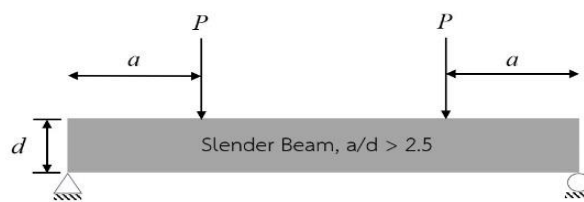
Model) มาช่วยวิเคราะห์คาน โดยจำเป็นจะต้องพิจารณาแรงกระทำ แรงปฏิกิริยาและรูปร่างของ  
 ชิ้นส่วนที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ การกระจายของ  
 หน่วยแรง การพิจารณาเส้นทางของแรงและการประยุกต์ใช้กับการออกแบบ



(ก) อัตราส่วนระหว่างช่วงความยาวต่อความลึก ( $L_n / h$ )



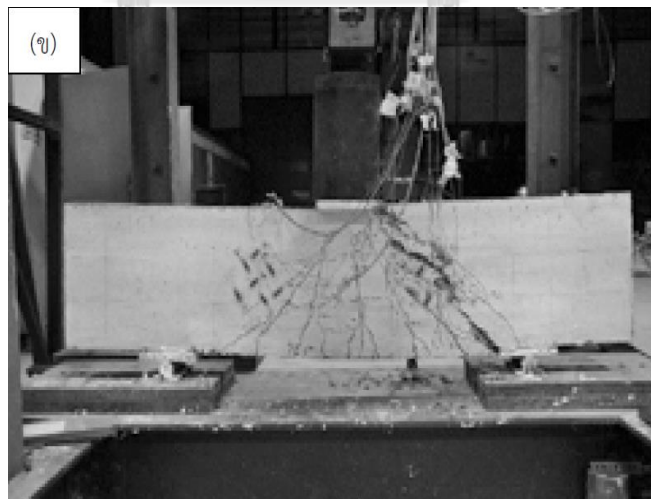
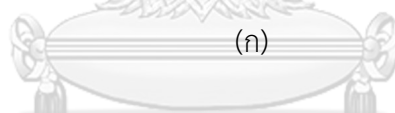
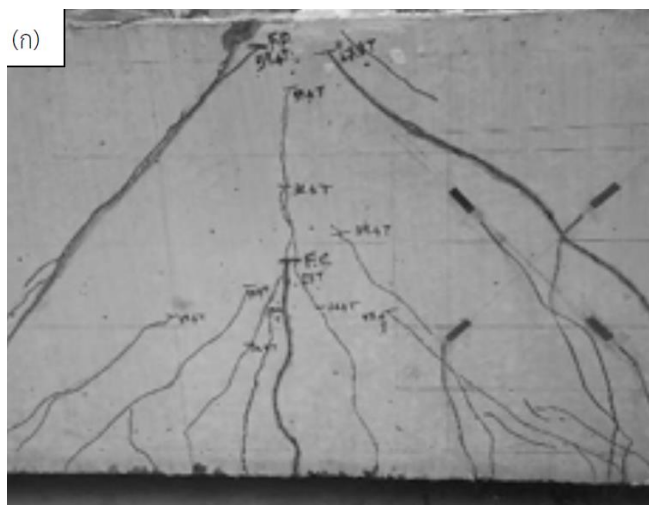
(ข) อัตราส่วนระหว่างช่วงการเอียงต่อความลึก ( $a / h$ )



(ค) อัตราส่วนระหว่างช่วงการเอียงต่อความลึกประสิทธิผล ( $a / d$ )

**รูปที่ 23** ลักษณะของ (ก) อัตราส่วนระหว่างช่วงความยาวต่อความลึก ( $L_n / h$ ) (ข) อัตราส่วนระหว่าง  
 ช่วงการเอียงต่อความลึก ( $a / h$ ) และ (ค) อัตราส่วนระหว่างช่วงการเอียงต่อความลึกประสิทธิผล  
 ( $a / d$ )

งานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็ก ตัวอย่างเช่น การศึกษาพฤติกรรมของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็ก: การทดสอบและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (ปราชญ์ อมรภิญโญ และคณะ, 2560) พบว่าค่า  $a/d$  ที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 1.5 จะมีลักษณะการแตกร้าวในแนวทแยงภายใต้แรงอัดของคอนกรีตหรือเกิดแรงเฉือนในแนวทแยง (Diagonal-splitting failure) และเมื่อค่า  $a/d$  มีมากกว่า 2.0 ขึ้นไปจะส่งผลในรูปแบบการวิบัติเปลี่ยนจากแรงเฉือนในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือนร่วมกับแรงดัด (Flexural shear failures) โดยตัวอย่างลักษณะการวิบัติของคานลึกลับแสดงดังรูปที่ 24



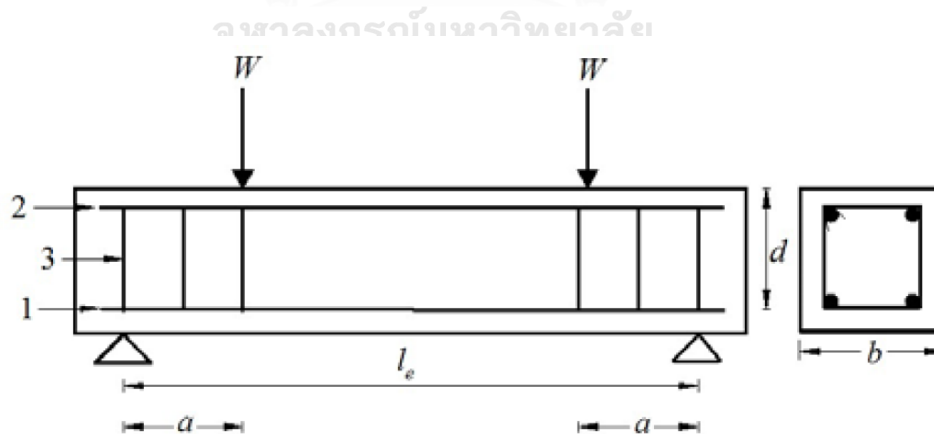
(ข)



(ค)

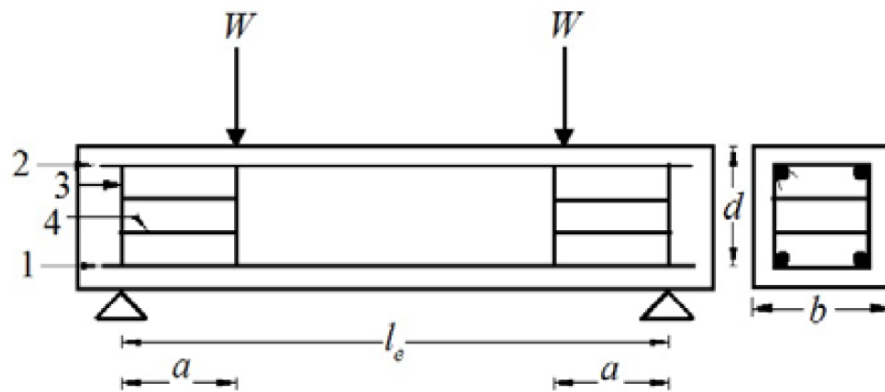
รูปที่ 24 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของคานลึกลับจากงานวิจัยของ อมรภิญโญ and ธีระวงษ์ (2017)

เมื่อพิจารณาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานลึกลับจะพบว่าจำเป็นต้องออกแบบเหล็กปลอกรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในคานลึกลับในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 25 โดยในการศึกษาจะแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ ค่า  $a/d$  มีค่าเท่ากับ 0.5 และ 1.0 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่มากที่สุดของคานพบว่าคานรูปแบบการเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนในแนวตั้งและแนวราบสามารถรับแรงได้ดีที่สุด และเมื่อค่า  $a/d$  เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนดียิ่งขึ้น และค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานแสดงดังรูปที่ 26

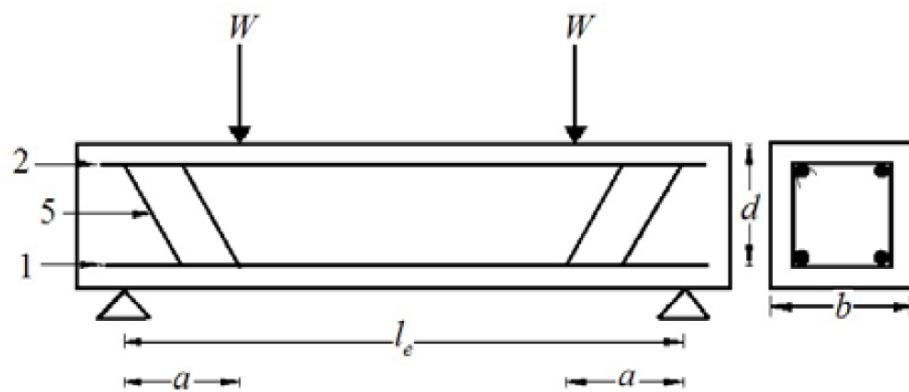


(ก) เสริมเหล็กปลอกในแนวตั้ง





(ข) เสริมเหล็กปดกแนวตั้งและแนวราบ



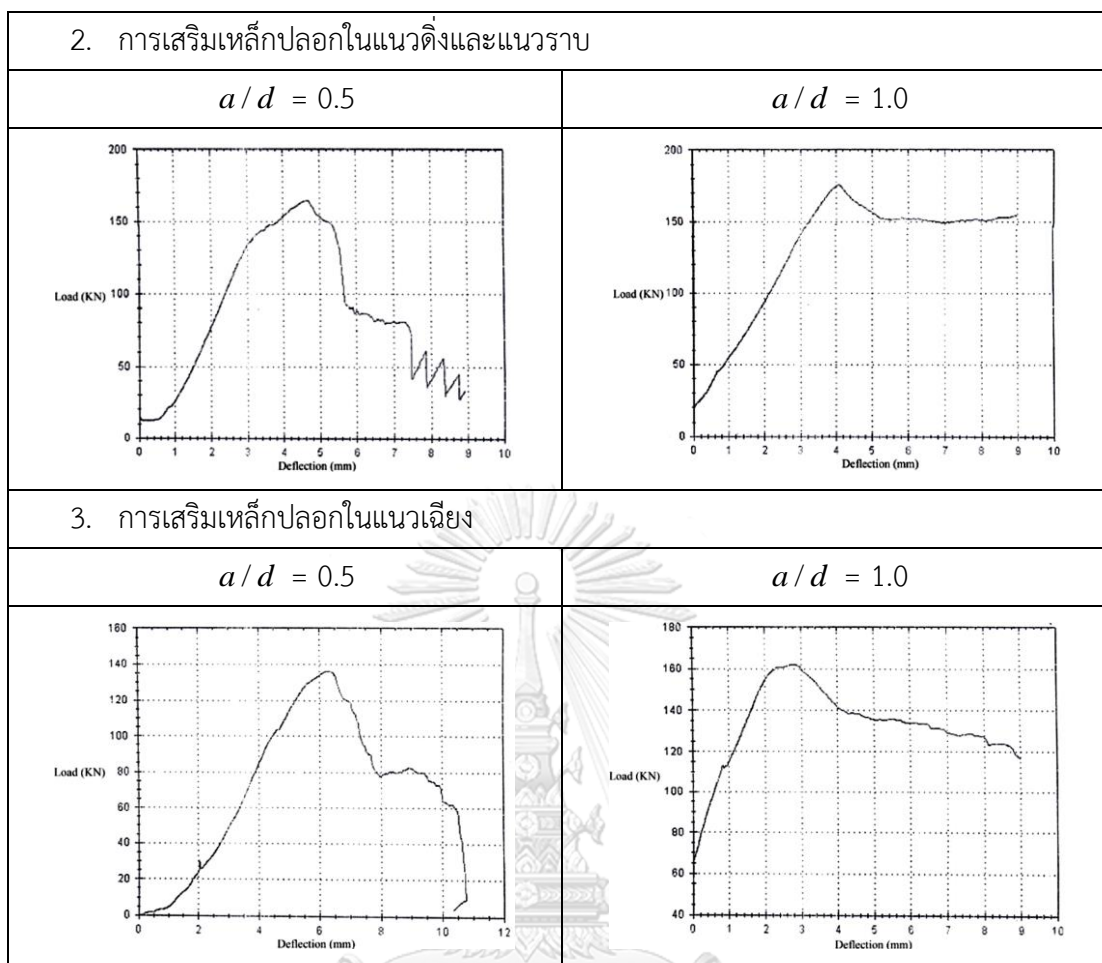
(ค) เสริมเหล็กปดกแนวเฉียง

รูปที่ 25 การเสริมเหล็กปดกรับแรงเฉือนในคานลิกในรูปแบบต่างๆ (Sayyad & Patankar, 2013)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. การเสริมเหล็กปดกในแนวตั้ง	
$a/d = 0.5$	$a/d = 1.0$

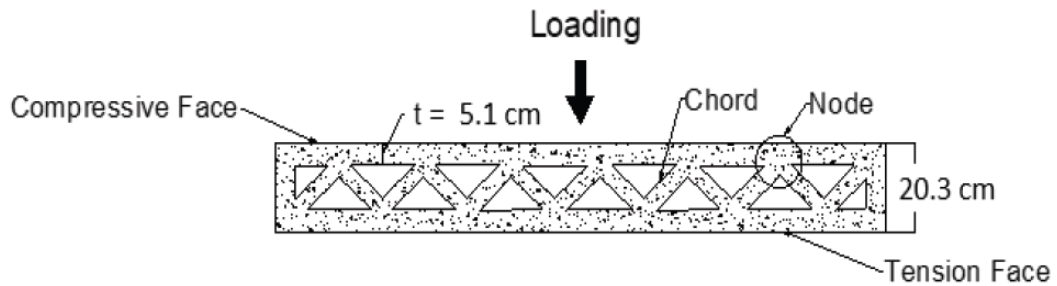


รูปที่ 26 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน (Sayyad & Patankar, 2013)

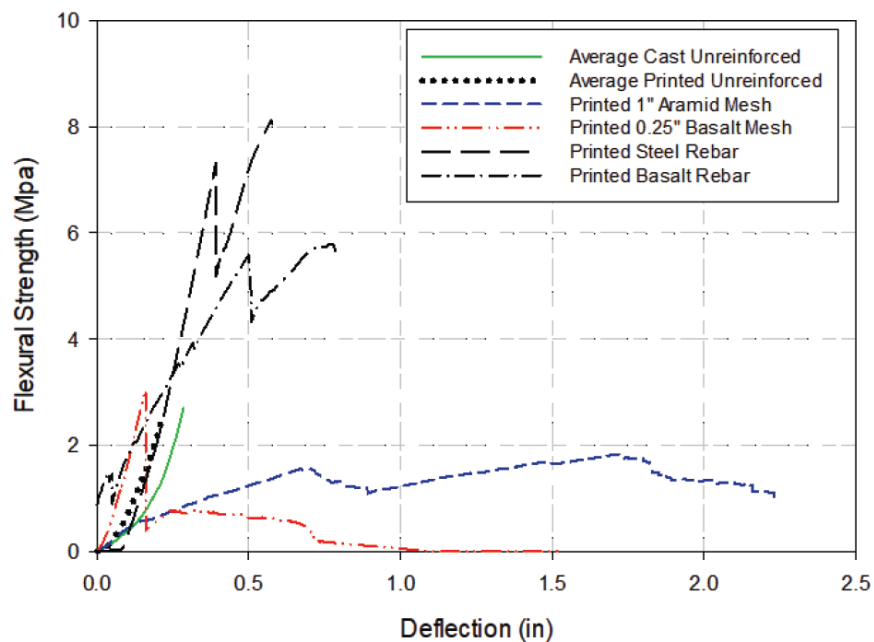
### 2.6.3 คานที่พิมพ์กรอบแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการแตกร้าวของคานที่พิมพ์กรอบแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยหัวข้อเรื่อง Flexural Behavior of 3D Printed Concrete Beam with Fiber Reinforcement (Al-Chaar & Kozych, 2020) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดแบบ 4 จุดของคานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยที่มีลักษณะการพิมพ์แสดงดังรูปที่ 27 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับการโก่งตัวของคานตัวอย่างที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 28 โดยประกอบด้วยคาน 6 ชนิด ได้แก่ คานพิมพ์ 3 มิติที่ไม่มีการเสริมแรง หรือ Printed None (P.N.) คานหล่อที่ไม่มีการเสริมแรง หรือ Cast None (C.N.) คานพิมพ์ 3 มิติ ที่เสริมแรงด้วยตาข่ายอารามิด 1 นิ้ว หรือ Printed Aramid Mesh (P.AM.) คานพิมพ์ 3 มิติ ที่เสริมแรงด้วยตาข่ายเส้นใยหินบะซอลต์ 0.25 นิ้ว หรือ Printed Basalt Mesh (P.BM) คานพิมพ์ 3 มิติ ที่เสริมแรงด้วยเหล็กเส้น Printed Steel Rebar (P.SR) และคานพิมพ์ 3 มิติ ที่เสริมแรงด้วยเส้นเหล็กเสริมที่ทำมาจากเส้นใยหินบะซอลต์ Printed

Basalt Rebar (P.BR) โดยมีรายละเอียดการทดสอบคานตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า P.SR มีความสามารถในการรับแรงดัดได้มากที่สุด แต่การรับการโก่งของคานนั้นไม่ดีเท่ากับ P.AM.1 ที่สามารถรับค่าการโก่งตัวได้ดีที่สุด ดังนั้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวจะพบว่าแรงดัดจะแปรผกผันกับการโก่งตัวของคานเนื่องจากคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุ (Ductility)



รูปที่ 27 ลักษณะการพิมพ์คานตัวอย่าง (Al-Chaar & Kozych, 2020)



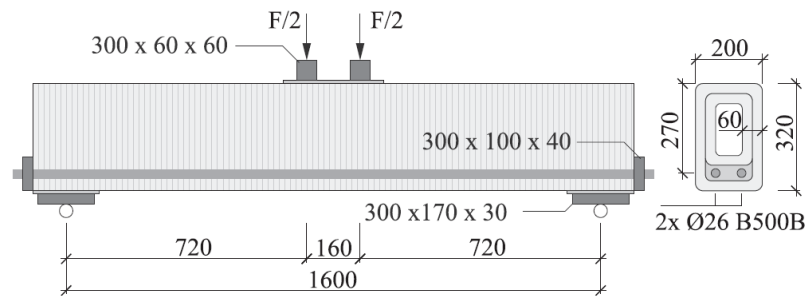
รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับการโก่งตัวของคานตัวอย่างที่เกิดขึ้น (Al-Chaar & Kozych, 2020)

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคานตัวอย่างต่างๆ ที่เสริมวัสดุรับแรงดัด (Al-Chaar & Kozych, 2020)

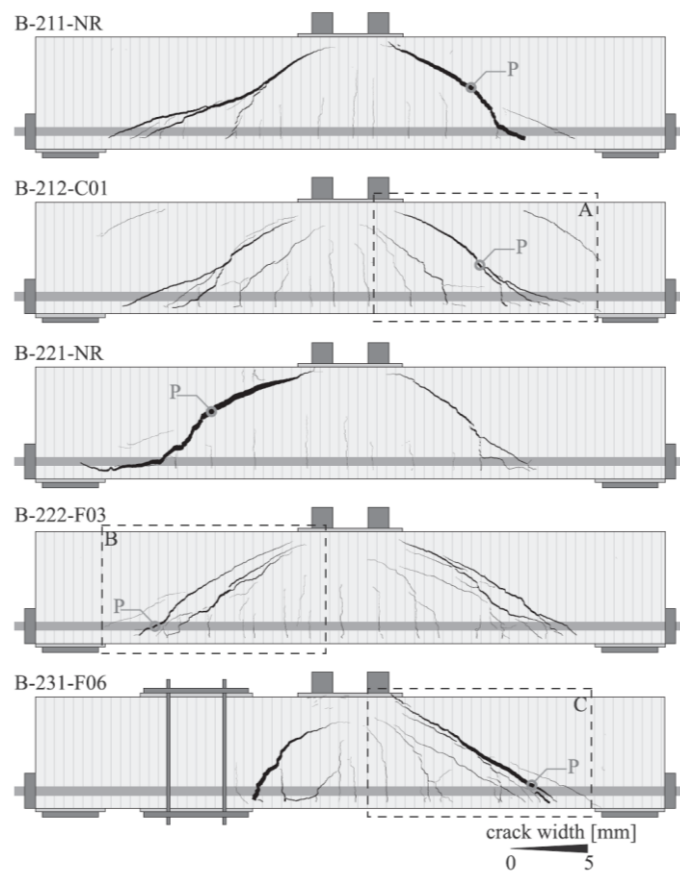
ตัวอย่าง	ความยาว (เมตร)	วิธีการเสริม กำลัง	อายุ (วัน)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	แรงดัดที่ ใช้ ทดสอบ (เมกะ ปาสคาล)	แรงดัดที่ ปรับแก้ไข (เมกะ ปาสคาล)	ระยะโก่งตัว (เซนติเมตร)
P.N.1	1.371	-	93	71	1.89	1.74	0.25
P.N.2	1.320	-	201	81	2.84	2.47	0.28
P.N.3	1.371	-	195	68	2.55	2.55	0.15
C.N.1	1.422	การหล่อใน แบบ	144	103	2.19	1.37	0.28
C.N.2	1.422	การหล่อใน แบบ	112	101	3.23	2.14	0.38
P.AM.1	1.371	ตะแกรงเหล็ก 1 นิ้ว	240	71	1.47	1.48	2.26
P.AM.2	1.320	ตะแกรงเหล็ก 1 นิ้ว	188	56	2.23	2.71	2.24
P.BM	1.371	ตะแกรง เหล็กบะ ซอลต์ 0.25 นิ้ว	72	83	3.05	2.39	0.15
P.SR	1.371	เหล็กเส้น	58	70	8.12	7.12	0.58
P.BR	1.371	เหล็กเส้นบะ ซอลต์	72	73	5.80	5.23	0.81

เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยเหล็กเส้นจะพบว่าลักษณะการแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของคาน โดย C.N. เกิดการวิบัติในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือน แต่ P.N. P.AM. และ P.BM เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัด และเมื่อพิจารณา P.SR และ P.BR พบว่าการลักษณะการแตกร้าวจะในแนวทแยงที่เกิดจากการวิบัติแบบแรงเฉือน และรอยร้าวจะเคลื่อนที่ไปจนกระทั่งรอยร้าวเกินจุดรองรับ ซึ่งจะเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตเหลือเพียงเหล็กเส้น นอกจากนี้มีงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการวิบัติของคานที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติที่เสริมแรงด้วยเหล็กเส้นเป็นจะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนที่ถูกบีบอัด (Shear Compression) โดย

ลักษณะการพิมพ์และการเสริมเหล็กรับแรงดึงแสดงดังรูปที่ 29 และลักษณะการแตกร้าวของคานแสดงดังรูปที่ 30



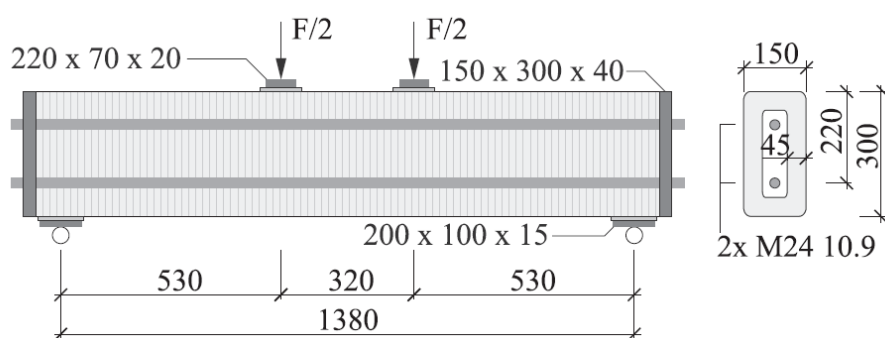
รูปที่ 29 ลักษณะพิมพ์และการเสริมเหล็กรับแรงดึงในคาน (Gebhard et al., 2021)



รูปที่ 30 ลักษณะการแตกร้าวในคานที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ (Gebhard et al., 2021)

#### 2.6.4 คานลึกลับที่พิมพ์กรอบแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ

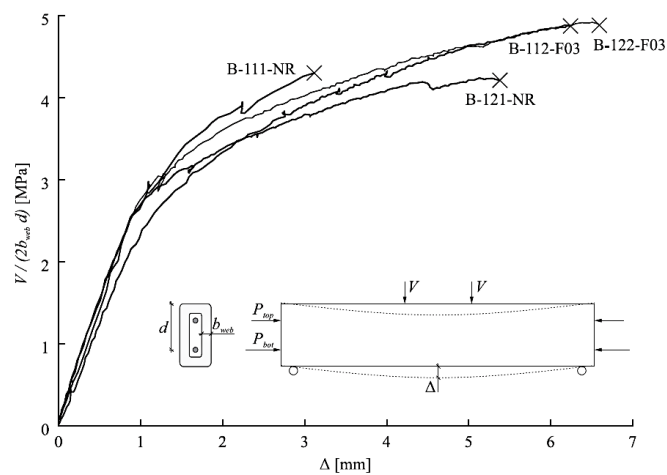
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการแตกร้าวของคานลึกลับที่พิมพ์กรอบแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยเรื่อง Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies (Gebhard et al., 2021) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของคานที่พิมพ์กรอบแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ โดยใช้วิธีการทดสอบแรงดัดแบบ 4 จุด มีลักษณะการพิมพ์และการเสริมเหล็กรับแรงดัดแสดงดังรูปที่ 31 พบว่าค่า  $a/d$  ของคานตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 1.77 โดยมีรายละเอียดการทดสอบคานตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยคานทั้งหมด 4 รูปแบบ ได้แก่ คานคอนกรีตที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ และเทคอนกรีตตรงระหว่างเหล็กเสริมกับกรอบแบบพิมพ์ (B-111-NR) คานคอนกรีตผสมเส้นใยที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ และเทคอนกรีตตรงระหว่างเหล็กเสริมกับกรอบแบบพิมพ์ (B-112-F03) คานคอนกรีตที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ และเทคอนกรีตตรงระหว่างเหล็กเสริมกับกรอบแบบพิมพ์ (B-121-NR) และคานคอนกรีตผสมเส้นใยที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ และเทคอนกรีตตรงระหว่างเหล็กเสริมกับกรอบแบบพิมพ์ (B-122-F03) โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 32 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวอย่างคานคอนกรีตผสมเส้นใยสามารถรับกำลังได้ดีกว่าคานตัวอย่างที่ไม่ได้ใส่เส้นใย โดยสังเกตได้จากความสามารถในการรับแรงดัดกับค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่าง B-112-F03 และ B-122-F03 ที่มากกว่า B-111-NR และ B-121-NR ตามลำดับ ดังนั้นค่าแรงดัดที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับค่าการโก่งตัวของคาน เมื่อพิจารณาลักษณะการแตกร้าวในคานที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 33 พบว่าการแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณตรงกึ่งกลางคานซึ่งเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงดัด



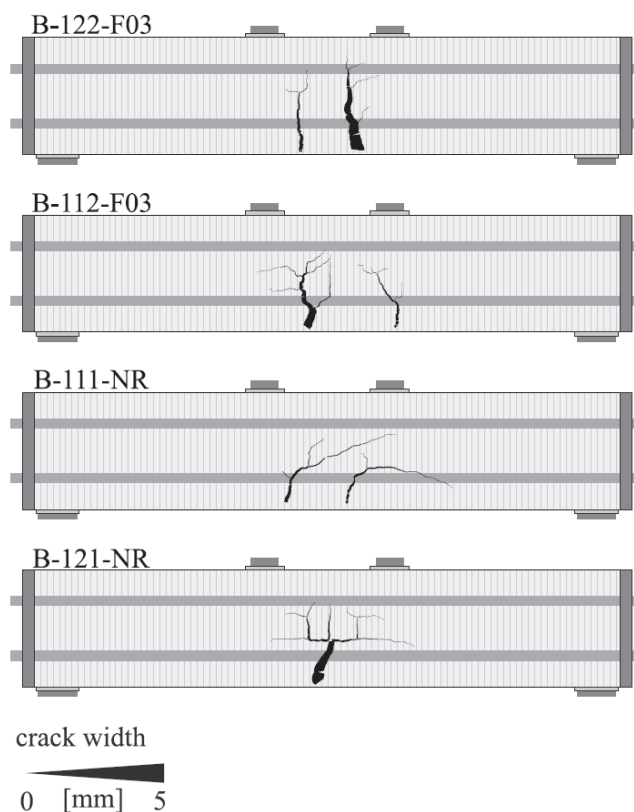
รูปที่ 31 ลักษณะพิมพ์และการเสริมเหล็กแรงดัดในคานลึกลับ (Gebhard et al., 2021)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคานตัวอย่างต่างๆ (Gebhard et al., 2021)

ตัวอย่าง	ความกว้าง ของเส้นกรอบ แบบ ( $b_{web}$ ) (มิลลิเมตร)	แรงกระทำ สูงสุด (กิโล นิวตัน)	แรงเฉือน สูงสุด (กิโล นิวตัน)	$\frac{V_{max}}{(2b_{web}d)}$ (เมกะปาสคาล)	ระยะโก่งตัว ( $\Delta$ ) (มิลลิเมตร)
B-111-NR	42	160.4	80.2	4.3	3.2
B-112-F03	43	184.8	92.4	4.9	6.1
B-121-NR	50	186.6	93.3	4.2	5.1
B-122-F03	52	225.3	112.7	4.9	6.6



รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับการโก่งตัวของคานตัวอย่างที่เกิดขึ้น (Gebhard et al., 2021)



รูปที่ 33 ลักษณะการแตกร้าวในคานลิกที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ (Gebhard et al., 2021)

## 2.7 กรณีศึกษาพฤติกรรมของการรับแรงของผนังที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

กรณีศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงของผนังเชิงรูปแบบสถาปัตยกรรมและการเลือกใช้รูปแบบการพิมพ์ที่มีความซับซ้อนของรูปทรงเรขาคณิตโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในการขึ้นรูปของผนัง ยกตัวอย่างกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

2.7.1 Load carrying capacity and failure mode of 3D printing mortar wall panel under axial compression loading (Jiramarootapong et al., 2020)

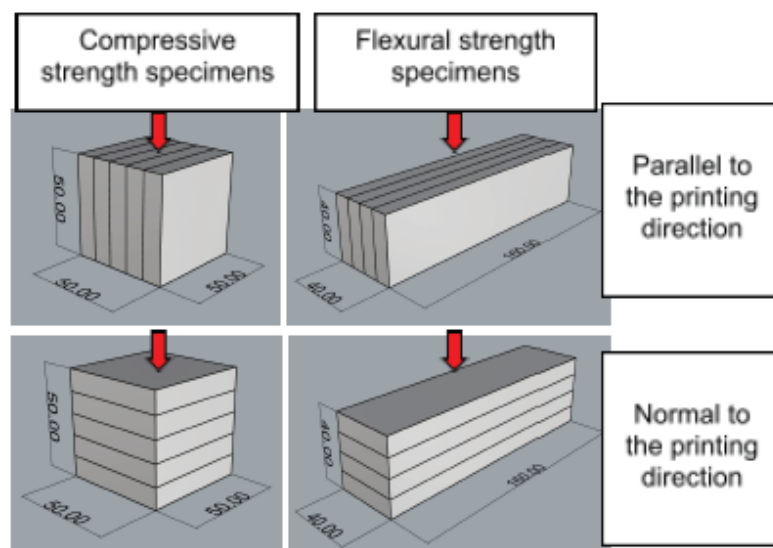
ศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการวิบัติของผนังมอร์ตาร์ที่ใช้การพิมพ์ 3 มิติภายใต้สถานะแรงอัดตามแนวแกน โดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $\phi$ ) 5 เซนติเมตร และส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับวัสดุพิมพ์ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary portland cement) ซีเมนต์ชนิดแข็งตัวเร็ว (Rapid-set cement) ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) ผงเถ้าลอย (Pulverized fly ash) ไฟเบอร์ไฮบริด (Hybrid fibers) แร่หินปูนบด (Crushed limestone aggregate) และสารเร่งปฏิกิริยาหรือชะลอการแข็งตัวของมอร์ตาร์ โดยการวิเคราะห์หาค่าการรับกำลังรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดัดของชิ้นตัวอย่าง และผนังที่พิมพ์ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 34



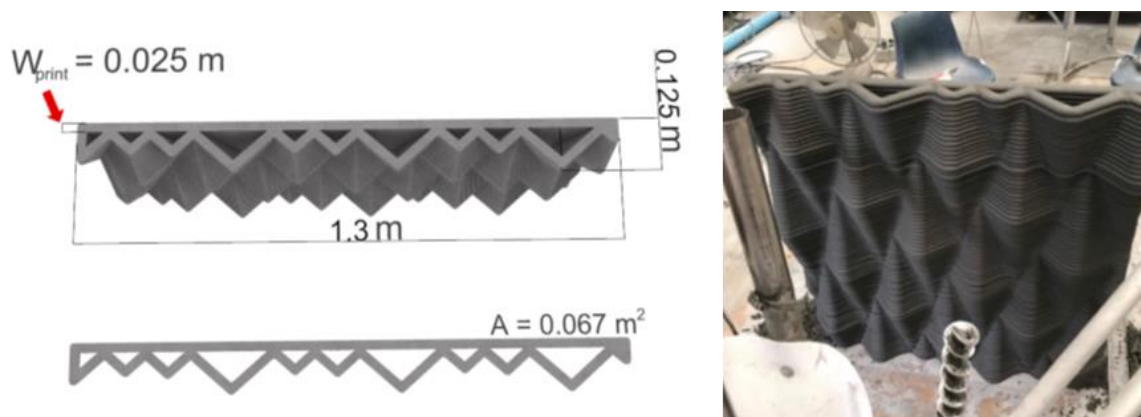
และ 35 ตามลำดับ โดยสามารถแบ่งกรณีขึ้นตัวอย่างที่เตรียมทดสอบกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (2021) และ ASTM C348 (2021) แสดงดังตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

จากรูปที่ 36 และ 37 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด ซึ่งสังเกตได้ว่าชิ้นงานตัวอย่างแบบขนาน หรือ Parallel (P) จะให้กำลังการรับแรงอัดที่น้อยกว่าชิ้นงานตัวอย่างแบบปกติ หรือ Normal (N) ในขณะที่ชิ้นตัวอย่างแบบ Parallel สามารถรับกำลังรับแรงดัดที่มากกว่าแบบ Normal และลักษณะวิบัติที่พบในชิ้นงานตัวอย่างแบบ Parallel จะเกิดรอยแตกที่บริเวณส่วนที่เชื่อมประสานกันระหว่างชั้นที่พิมพ์ของมอร์ตาร์ ซึ่งรอยร้าวอาจเกิดขึ้นก่อนเวลาอันควรในชิ้นงานที่ทำการทดสอบ ในขณะที่รอยร้าวที่เกิดในชิ้นตัวอย่างแบบ Normal จะเกิดบนระนาบที่อ่อนแอของชั้นที่พิมพ์ทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 38 ส่วนผลการทดสอบผนังที่พิมพ์ 3 มิติ พบว่ารอยร้าวแรกจะเกิดจากน้ำหนักกระทำประมาณ 75 ตัน ที่บริเวณผิวนอก และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำถึง 100 ตัน พบว่าเกิดการแยกชั้นของผนังที่พิมพ์ 3 มิติ และเกิดการวิบัติของโครงสร้างที่แรง 115 ตัน โดยลักษณะการวิบัติของผนังที่พิมพ์ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 39 เมื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานตัวอย่าง 5cm-1.0cm-N มาเปรียบเทียบกับผนังที่พิมพ์ 3 มิติ พบว่าการรับน้ำหนักกระทำตามทฤษฎีมีค่า 317.7 ตัน แต่จากการทดสอบสามารถรับน้ำหนักกระทำได้เพียง 115 ตัน เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนความแตกต่างของสามารถรับน้ำหนักกระทำตามทฤษฎีต่อการทดสอบมีค่าประมาณ 2.76 เท่า เนื่องจากการวิบัติของการโค้งตัวของผนังที่พิมพ์ 3 มิติ ที่มีรูปร่างและพื้นผิวของผนังกลวงและกรอบผนังที่บาง และสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างที่พิมพ์ 3 มิติ เกิดความเค้นในตัวอย่างผนังที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 34 รูปแบบการพิมพ์ตัวอย่างชิ้นงาน (Jiramarootapong et al., 2020)



รูปที่ 35 การพิมพ์ผนัง (3DP) (Jiramarootapong et al., 2020)

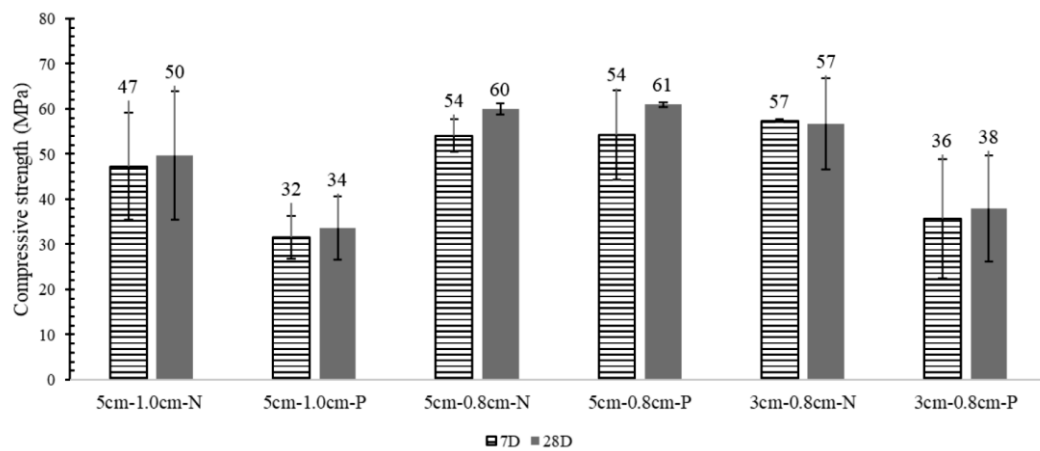
ตารางที่ 6 การเตรียมขนาดชิ้นงานเพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังอัด (Jiramarootapong et al., 2020)

ตัวอย่าง	ความยาว (เซนติเมตร)	ความกว้าง (เซนติเมตร)	ความหนา ของชั้นที่พิมพ์ (เซนติเมตร)	ทิศทางการ พิมพ์	จำนวน ตัวอย่างที่ใช้ ทดสอบ
3cm-0.8cm-N	5	3	0.8	ขนานแกน x	3
3cm-0.8cm-P	5	3	0.8	ขนาดแกน z	3
5cm-0.8cm-N	5	5	0.8	ขนานแกน x	3
5cm-0.8cm-P	5	5	0.8	ขนาดแกน z	3
5cm-1.0cm-N	5	5	1.0	ขนานแกน x	3
5cm-1.0cm-P	5	5	1.0	ขนาดแกน z	3

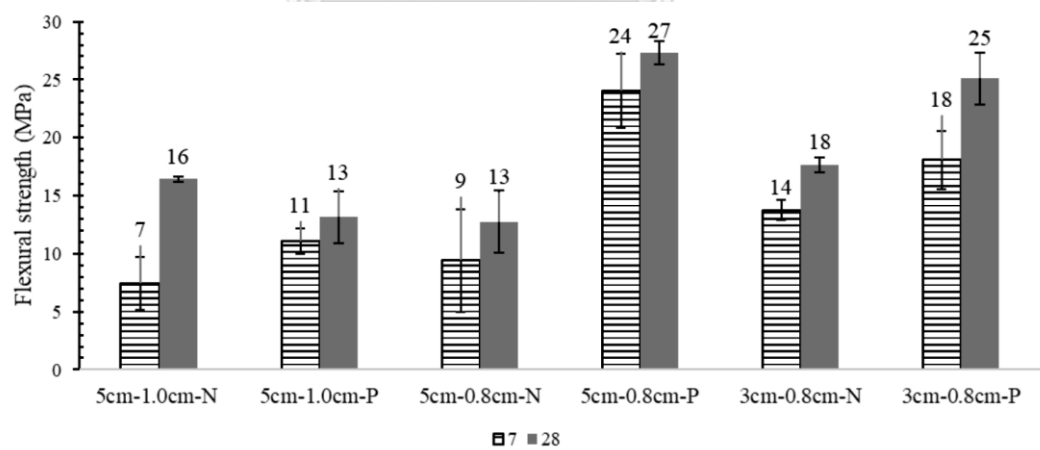
ตารางที่ 7 การเตรียมขนาดชิ้นงานเพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังดัด (Jiramarootapong et al., 2020)

ตัวอย่าง	ความยาว (เซนติเมตร)	ความกว้าง (เซนติเมตร)	ความหนา ของชั้นที่พิมพ์ (เซนติเมตร)	ทิศทางการ พิมพ์	จำนวน ตัวอย่างที่ใช้ ทดสอบ
3cm-0.8cm-N	16	3	0.8	ขนานแกน x	3
3cm-0.8cm-P	16	3	0.8	ขนาดแกน z	3
5cm-0.8cm-N	16	5	0.8	ขนานแกน x	3
5cm-0.8cm-P	16	5	0.8	ขนาดแกน z	3

ตัวอย่าง	ความยาว (เซนติเมตร)	ความกว้าง (เซนติเมตร)	ความหนา ของชั้นที่พิมพ์ (เซนติเมตร)	ทิศทางการ พิมพ์	จำนวน ตัวอย่างที่ใช้ ทดสอบ
5cm-1.0cm-N	16	5	1.0	ขนานแกน x	3
5cm-1.0cm-P	16	5	1.0	ขนาดแกน z	3



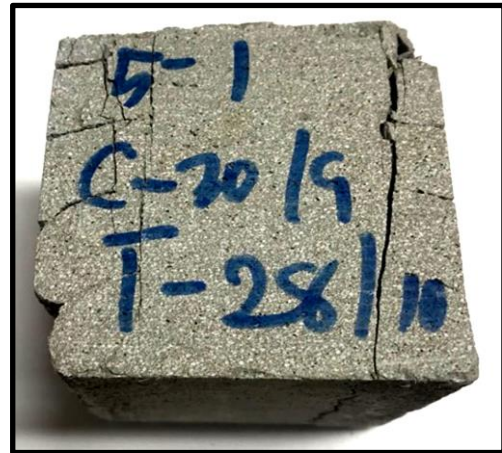
รูปที่ 36 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Jiramarootapong et al., 2020)



รูปที่ 37 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด (Jiramarootapong et al., 2020)



(ก) ชิ้นงานตัวอย่างแบบ Parallel



(ข) ชิ้นงานตัวอย่างแบบ Normal

รูปที่ 38 ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างเนื่องจากกำลังรับแรงอัด (Jiramarootapong et al., 2020)



(ก) การพังทลายของผนังที่พิมพ์ 3 มิติ



(ข) การแตกหักที่ที่ผนังที่พิมพ์ 3 มิติ

รูปที่ 39 ลักษณะการวิบัติของโครงสร้างผนังที่เกิดจากแรงดัด (Jiramarootapong et al., 2020)

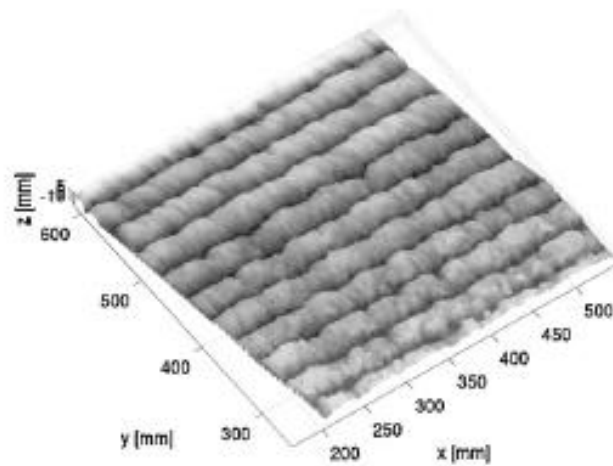
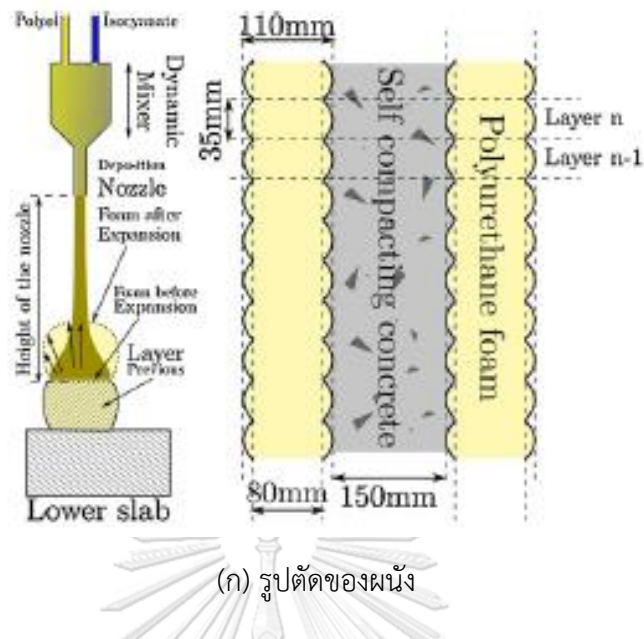
2.7.2 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete (Furet et al., 2019)

ศึกษาการก่อสร้างด้วยการพิมพ์ 3 มิติของผนังที่ซับซ้อนด้วยโฟมพอลิเมอร์และคอนกรีตโดยนำเสนอกระบวนการ Additive Manufacturing (AM) ขั้นสูงที่นำมาใช้สำหรับการก่อสร้าง คือเทคโนโลยี Batiprint3D™ ซึ่งประกอบด้วยการสร้างผนังที่ซับซ้อนของวัสดุที่พิมพ์ 3 มิติโดยใช้หุ่นยนต์เคลื่อนที่และพอลิคาร์บอนเนตมีลักษณะการพิมพ์โฟมพอลิเมอร์สองข้างเป็นกรอบ โดยใช้วัสดุโฟมโพลียูรีเทน หรือ Polyurethane foam (PU foam) เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำ และเกิดการเสียรูปได้ง่ายเมื่อเติมช่องว่างภายในด้วยคอนกรีตตรงกลางดังแสดงในรูปที่ 40 โดย PU foam ทำหน้าที่เป็นฉนวนทั้งภายในและภายนอกของบ้าน ซึ่งคล้ายกับเทคนิคการใช้แบบหล่อโฟมขยายตัวที่เติมด้วยคอนกรีตหรือรูปแบบคอนกรีตหุ้มฉนวน เทคนิคนี้สามารถป้องกันความร้อนของอาคารได้เมื่อนำมาทดสอบหาค่าการเว้นระยะระหว่างผนัง PU foam ทั้งสองข้างพบว่าสามารถเทคอนกรีตได้สูงถึง 50 เซนติเมตร ดังนั้นจึงทำการทดลองด้วยการพิมพ์ 3 มิติ และมีคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทดสอบดังนี้

(1) โฟมโพลียูรีเทน (PU foam) : ความหนาแน่นของโฟม 35 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการนำความร้อน 0.027 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น 7 เมกะปาสคาล และความต้านทานความร้อนของผนัง (กรอบแบบ PU foam ที่เทคอนกรีต) 6.75 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ ความสามารถในการพิมพ์ผนัง PU ที่มีความกว้างอยู่ในช่วงระหว่าง 80 ถึง 100 มิลลิเมตร และความสูงของแต่ละชั้นประมาณ 35 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ความต้านทานความร้อนของผนัง (กรอบแบบ PU foam ที่เทคอนกรีต) อย่างน้อยเท่ากับ 6.75 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์

(2) คอนกรีต : ชนิดอัดแน่นด้วยตัวเองได้ (Self-Compacting Concrete, SCC) ที่มีคุณสมบัติการไหลประมาณ 600 มิลลิเมตร

(3) ส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ ซีเมนต์ประเภท CEM III 42.5 หินปูนที่ใช้เติมให้วัสดุอื่นๆ (Limestone filler) ทราบที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0 ถึง 4 มิลลิเมตร และกรวดที่มีขนาดอยู่ในช่วง 4 ถึง 10 มิลลิเมตร น้ำ และสารเร่งการก่อตัวของคอนกรีต



(ข) ภาพสแกน 3 มิติ ของพื้นผิวโพลียูรีเทนโฟม

**รูปที่ 40** ตัวอย่างการพิมพ์ชิ้นงาน (Furet et al., 2019)

เครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้จะมีหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคือ 55 มิลลิเมตร และหัวฉีดถูกติดตั้งไว้ที่ด้านบนสุดของแบบหล่อโฟมขยายตัว หลังจากนั้นเทคอนกรีตใน 4 ชั้นตอนที่ความสูงต่างกัน ได้แก่ ความสูงที่ 200 มิลลิเมตร 500 มิลลิเมตร 850 มิลลิเมตร และ 1,000 มิลลิเมตร พร้อมกับการเสียรูป ปรากฏว่าการเสียรูปจากน้ำที่ทำให้เกิดจากแรงดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure) ดังนั้นการเสียรูปแปรผันตรงกับความสูงของน้ำ นอกจากนี้จุดที่เกิดการเสียรูปสูงสุดจะเท่ากับ 25 มิลลิเมตร สำหรับน้ำที่มีความสูง 60 เซนติเมตร และการเสียรูปที่ 10 มิลลิเมตร สำหรับน้ำที่มีความ



สูง 40 เซนติเมตร และอยู่ห่างจากแผ่นพื้นประมาณ 50 เซนติเมตร เมื่อใช้โปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis Professional เพื่อคำนวณตำแหน่งของตัวเว้นระยะ โดยกำหนดคุณสมบัติทางกลของ PU foam และสมมติว่ามีแรงดันไฮโดรสแตติกของคอนกรีตเป็นแรงกระทำที่ใช้ จนกว่าจะได้การเสียรูปที่ต่ำกว่า 5 มิลลิเมตร พบว่าการเสียรูปสูงสุดที่ได้รับคือ 20 มิลลิเมตร สำหรับความสูงของคอนกรีต 100 เซนติเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงความล้มเหลวของแบบหล่อโฟมขยายตัวในพื้นที่ก่อสร้างและการสูญเสียวัสดุที่สำคัญ อีกทั้งความสูงของคอนกรีตที่สามารถเทลงใน แบบหล่อโฟมขยายตัว จะต้องต่ำกว่า 50 เซนติเมตร

เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบหุ่นยนต์ของ BatiPrint3D™ ถูกนำมาใช้ในเดือนกันยายน ค.ศ. 2017 เพื่อสร้างที่อยู่อาศัย YHNOVA™ ใช้เวลาก่อสร้างทั้งหมด 54 ชั่วโมงแสดงดังรูปที่ 41 มีการควบคุมการเสียรูปต่ำกว่า 5 มิลลิเมตร และเป็นบ้านของ Nantes Metropole Habitat ตั้งอยู่ที่เมืองนีองต์ ประเทศฝรั่งเศสมีพื้นที่ 95 ตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 42



รูปที่ 41 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ และการพิมพ์ Yhnova™ (Furet et al., 2019)



รูปที่ 42 ตัวอย่างที่อยู่อาศัย Yhnova™ (Furet et al., 2019)

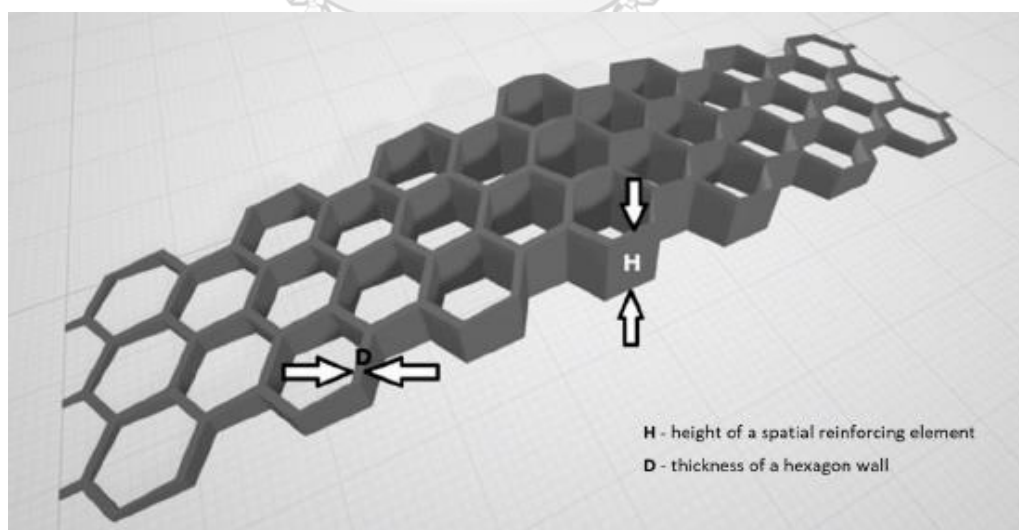
## 2.8 กรณีศึกษาพฤติกรรมของการรับแรงของคานที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

กรณีศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของการรับแรงของคานที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในการขึ้นรูปและประกอบกับการใช้วัสดุหรือรูปแบบที่ใช้เสริมแรงเพื่อรับแรงคาน ยกตัวอย่างกรณีศึกษาต่อไปนี้

### 2.8.1 Effect of 3D Printed Spatial Reinforcement on Flexural Characteristics of Conventional Mortar (Katzer & Szatkiewicz, 2020)

เป็นการศึกษาผลกระทบของการเสริมแรงเชิงพื้นที่ที่พิมพ์ 3 มิติ ที่มีผลต่อการคานของมอร์ตาร์ โดยมีการเสริมแรงด้วยพอลิเมอร์ที่พิมพ์ 3 มิติ และเลือกใช้ลักษณะรูปทรงเรขาคณิตแบบหกเหลี่ยมเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ดังนั้นการใช้พอลิเมอร์เพื่อรับแรงคานเหล็กกล้า ถึงแม้ว่าคุณสมบัติความแข็งแรงและโมดูลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์จะมีค่าต่ำกว่าเหล็กกล้า

การพิมพ์ 3 มิติ ของผนังหกเหลี่ยมเพื่อเสริมแรงเชิงพื้นที่มีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ ความสูง (H) และความหนา (D) แสดงดังรูปที่ 43 และมีกรณีศึกษาขนาดความสูง และความหนาที่ใช้ออกแบบแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 8 เมื่อนำมาคิดเป็นปริมาตรของการพิมพ์ผนังหกเหลี่ยมพบว่ามีค่าสูงกว่ามากถึงร้อยละ 2.8 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเสริมเหล็กเส้นแบบเดิมที่มักจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 1.5 นอกจากนี้ยังพบว่ามีลักษณะความสูง (H) 20 มิลลิเมตร และความหนา (D) 2 มิลลิเมตร จะส่งผลต่อน้ำหนักของชิ้นส่วน และมีการใช้ซอฟต์แวร์ทางวิทยาศาสตร์เฉพาะเพื่อสร้างการตีความแบบกราฟิกของแผนภาพ 3 มิติด้วยสมการตรีโกณมิติ



รูปที่ 43 ลักษณะองค์ประกอบของการพิมพ์ 3 มิติ ของผนังหกเหลี่ยม (Katzer & Szatkiewicz, 2020)

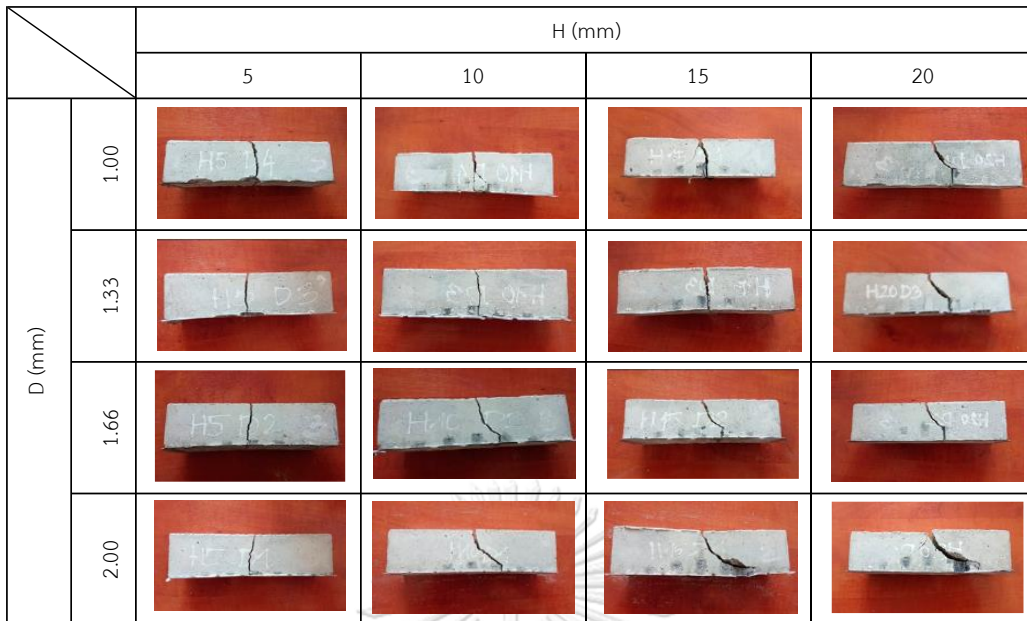


ตารางที่ 8 การเตรียมขนาดชิ้นงาน (Katzner & Szatkiewicz, 2020)

ความหนาของ ชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	ความสูงของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)			
	5	10	15	20
1.00	1.25	2.25	3.2	4.17
1.33	1.42	3.55	3.71	4.87
1.66	2.07	3.60	5.09	6.60
2.00	2.35	4.18	5.98	7.80

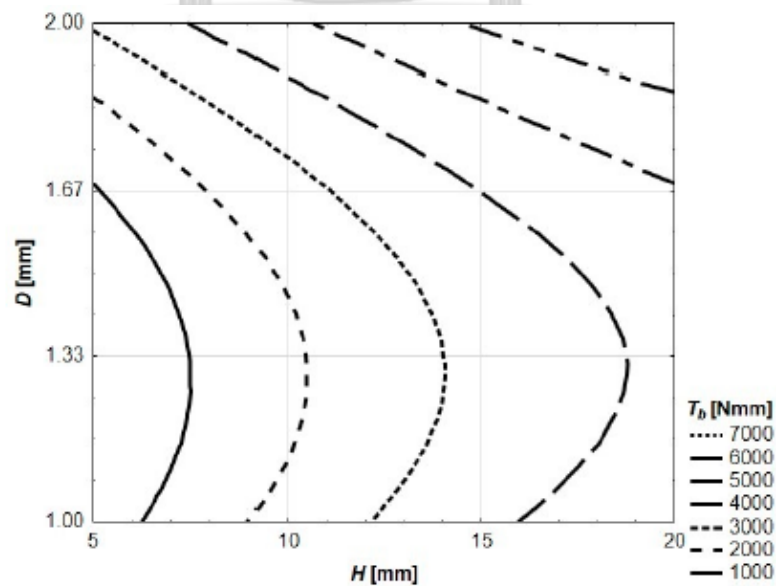
การทดสอบคานจะใช้แรงกระทำ ( $F$ ) ที่ลดลงตรงกลางคานที่ความเร็ว 50 นิวตันต่อวินาที และบันทึกค่าการโก่งตัวทุกๆ 0.02 วินาที จะทำการทดสอบการัดจนกระทั่งเกิดการโก่งตัวที่ 3 มิลลิเมตร โดยตัวอย่างทั้งหมดถูกพิจารณาว่าถูกทำลายในที่สุด ข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดสอบจะนำมาสร้างแผนภูมิแรงกระทำและการโก่งตัว ซึ่งขึ้นอยู่กับขีดจำกัดของสัดส่วน (1p) แรงกระทำสูงสุด ( $F_{max}$ ) และการโก่งตัวเท่ากับ  $l/150$  และการโก่งตัวเท่ากับ  $l/75$  เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับการเสริมแรงแบบดั้งเดิม คือ คอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตเสริมใยไฟเบอร์ และเฟอโรโรซิเมนต์ นอกจากนี้มีการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่เสริมแรง โดยคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ใช้จะมีความหนาแน่นเท่ากับ 2,363 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลังอัดเท่ากับ 43.3 เมกะปาสคาล และกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 8.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับคุณสมบัติทางกลอื่นๆ ทั้งหมดของคานเสริมแรง หลังจากทำการทดสอบจนกระทั่งคานถูกวิบัติจะปรากฏลักษณะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 44

พฤติกรรมของคานที่ทดสอบมีสภาพเป็นกึ่งพลาสติกมีลักษณะที่คล้ายกับ SFRC หรือ ferrocement แต่ในทางกลับกันการโก่งตัวจากการวิบัติพบว่าสูงกว่ากรณีของ SFRC หรือ ferrocement และเป็นไปไม่ได้ที่จะใช้มาตรฐานอ้างอิงเกี่ยวกับระบบคอมโพสิตซีเมนต์ โดยสามารถสรุปประเด็นสำคัญ คือ พฤติกรรมการดัดของคานที่ทดสอบสำหรับแต่ละจุดสำคัญทั้งสี่จุด เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้เส้นโค้ง ซึ่งพื้นที่ที่คำนวณได้แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ต้องใช้เพื่อไปยังจุดหนึ่งบนเส้นกราฟการโก่งตัวรับน้ำหนักระหว่างทดสอบกำลังรับแรงดัดตามแนวคิดเพิ่มเติมมีที่มาจากมาตรฐาน JSCE-SF4 (1984)



รูปที่ 44 ลักษณะรอยแตกร้าวของคาน (Katzer & Szatkiewicz, 2020)

ความยืดหยุ่นในการแรงดัด ( $T_b$ ) ใช้อธิบายค่าพลังงานที่กระจุกกระจายแสดงดังรูปที่ 45 โดยใช้ความสูง (H) และความหนา (D) ของผนังทกเหลี่ยมเป็นตัวแปรอิสระและนำเสนอแผนภาพของ  $T_b$  สำหรับ  $F_{max}$  โดยพบว่ามีค่าตั้งแต่ 244 นิวตัน·มิลลิเมตร (สำหรับ H = 5 มิลลิเมตร และ d = 1.00 มิลลิเมตร) ถึง 7,049 นิวตัน·มิลลิเมตร (สำหรับ H = 20 มิลลิเมตร และ d = 2.00 มิลลิเมตร) ดังนั้นค่า  $T_b$  สำหรับ  $F_{max}$  จะแปรผันตาม H และ D ที่เพิ่มขึ้น

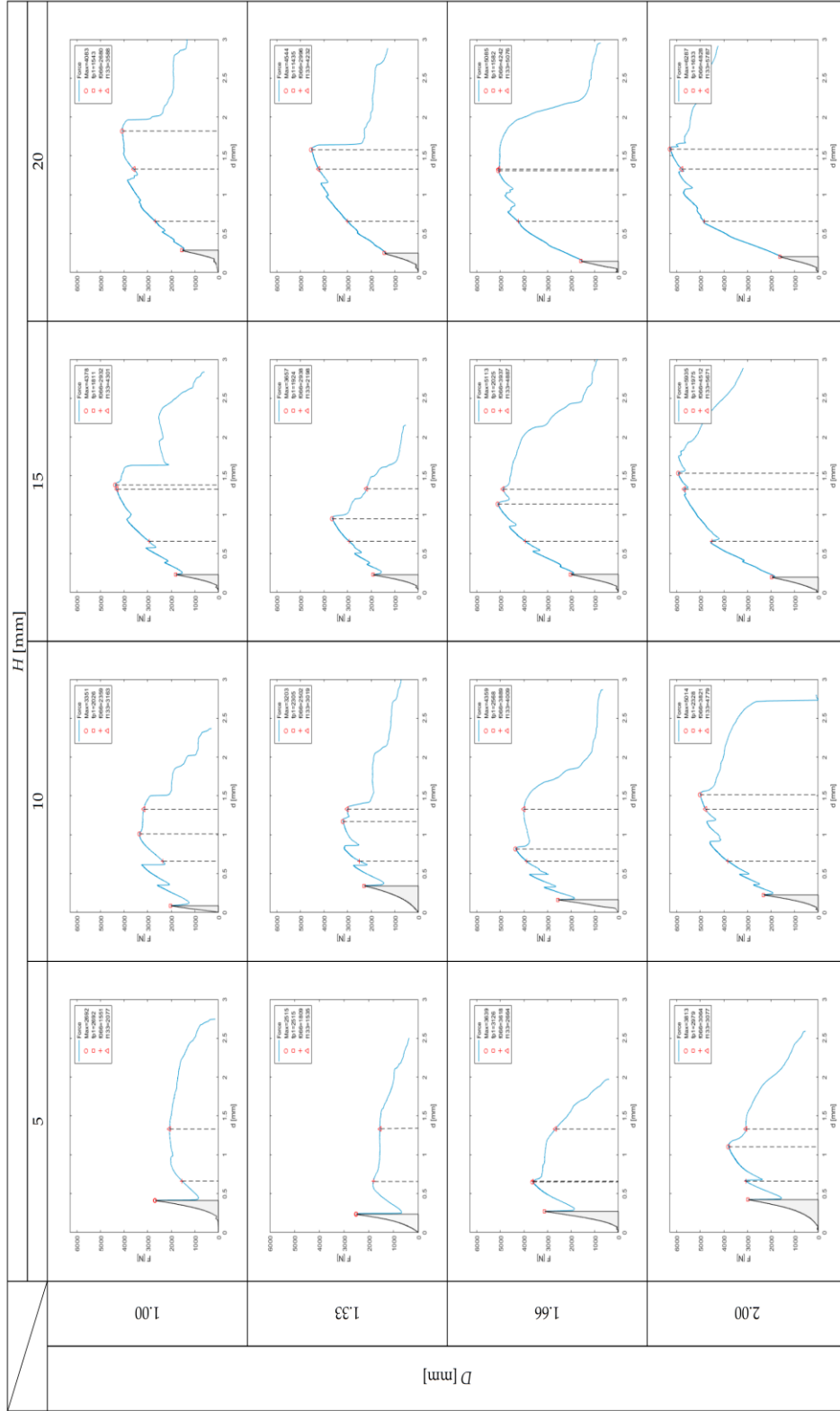


รูปที่ 45 ลักษณะความยืดหยุ่นในการรับแรงดัดของคานทดสอบที่แรงกระทำ (Katzer & Szatkiewicz, 2020)

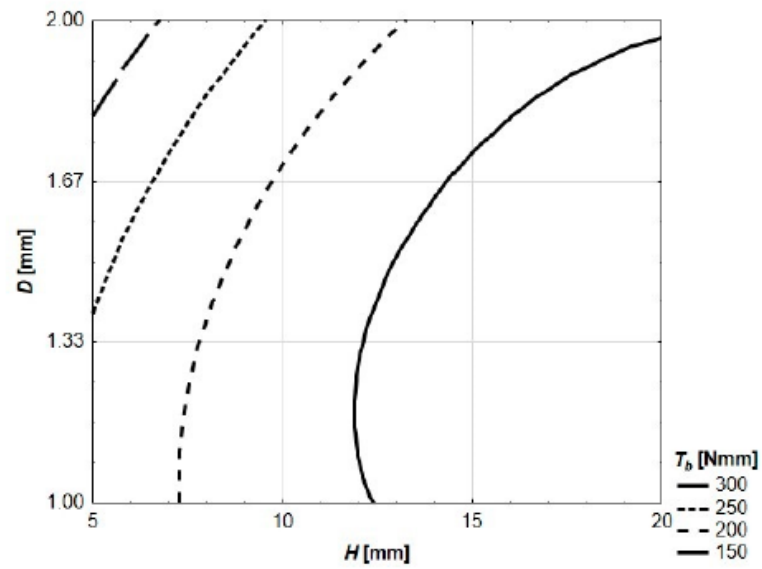
กรณีมอร์ตาร์ที่ไม่มีการเสริมแรงค่า  $F_{max}$  ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะเท่ากับ 3,413 นิวตัน ดังนั้น การรับแรงของคานที่มีการพิมพ์องค์ประกอบของผนังทหเหลี่ยมที่มีความสูง และความหนาแตกต่างกัน (  $H = 5$  มิลลิเมตร กับ  $D = 1.00$  มิลลิเมตร  $H = 5$  มิลลิเมตร กับ  $D = 1.33$  มิลลิเมตร  $H = 10$  มิลลิเมตร กับ  $D = 1.00$  มิลลิเมตร และ  $H = 10$  มิลลิเมตร กับ  $D = 1.33$  มิลลิเมตร) พบว่าค่า  $F_{max}$  ที่จะเกิดขึ้นเท่ากับร้อยละ 79 74 98 และ 94 ของมอร์ตาร์ที่ไม่มีการเสริมแรงตามลำดับ ในทางกลับกันคานที่มีองค์ประกอบเชิงพื้นที่มีลักษณะ  $H = 20$  มิลลิเมตร และ  $D = 2.00$  มิลลิเมตร พบว่าค่า  $F_{max}$  เท่ากับร้อยละ 184

แรงกระทำสูงสุดจะบรรลูลงหลังจากถึงจุดสูงสุดแรกแสดงดังรูปที่ 46 จะสะท้อนถึงพฤติกรรมการยืดหยุ่นของคอนกรีตปกติ ในกรณีของชิ้นงานที่ทดสอบมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวไม่เป็นสัดส่วนเหมือนในกรณีของคอนกรีตทั่วไปโดยเฉพาะชิ้นงานที่ทดสอบมีการเสริมแรงด้วย  $H = 5$  มิลลิเมตร แต่มีความคล้ายคลึงกัน ดังนั้น สามารถวิเคราะห์เพิ่มเติมได้แสดงดังรูปที่ 47 สำหรับการเสริมแรงด้วยองค์ประกอบเชิงพื้นที่ของ  $H = 5$  มิลลิเมตร และ  $D = 2.00$  มิลลิเมตร นอกจากนี้ความทนทานต่อแรงดัดสำหรับการโก่งตัวที่  $1/150$  และ  $1/75$  จะแสดงดังรูปที่ 48 และ 49 ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าคานที่ทดสอบสามารถรับแรงได้ แต่องค์ประกอบของพอลิเมอร์ที่พิมพ์ 3 มิติที่มีรูปร่าง และขนาดที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อพฤติกรรมการดัดของคาน ดังนั้น การศึกษานี้สามารถใช้มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับความเหนียวและการดัดของวัสดุเท่านั้น

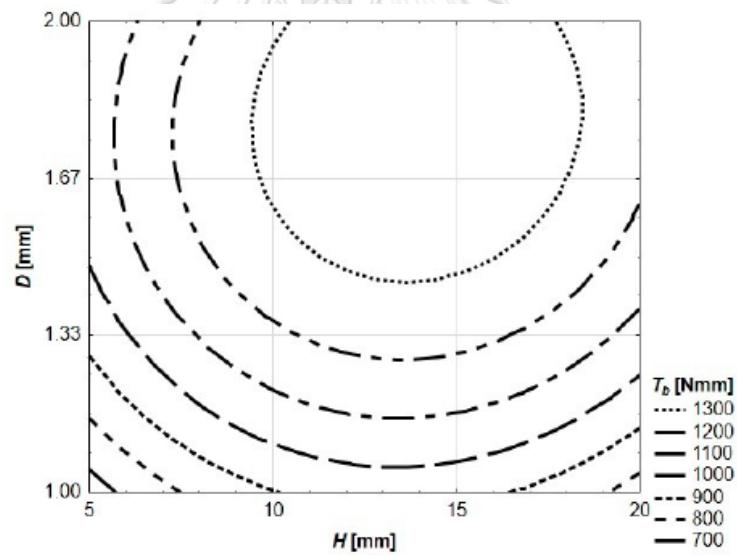
ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม คือ การศึกษารูปร่าง และขนาดที่แตกต่างกันของการเสริมแรงแบบพอลิเมอร์ที่พิมพ์ 3 มิติ และควรนำมาทดสอบกับชิ้นงานขนาดใหญ่ เช่น คาน และเสา เป็นต้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจประเด็นเรื่องการทดสอบคานที่มีขนาดการใช้งานจริงโดยใช้การเสริมแรงด้วยเหล็กกล้า และพิมพ์กรอบหล่อแบบคานด้วยวัสดุอมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ พร้อมกับเทคอนกรีต เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่เกิดขึ้น



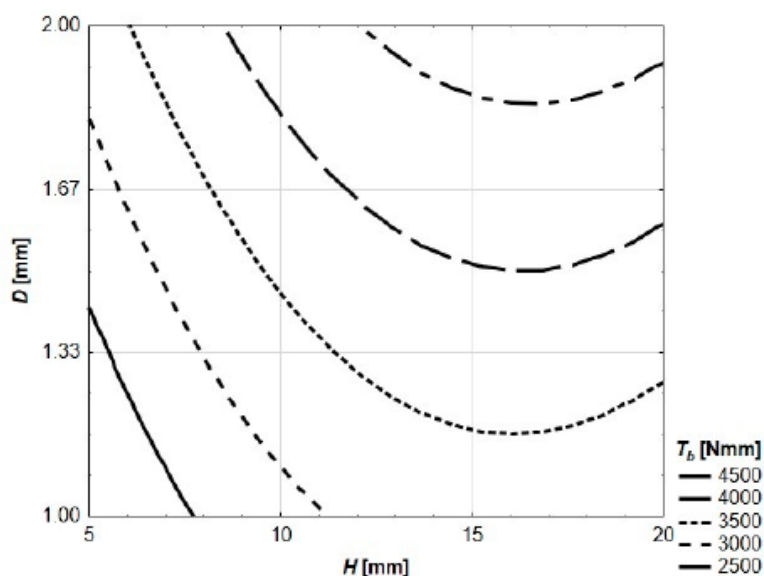
**รูปที่ 46** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (F) – การโก่งตัว (d) ของชิ้นงานที่ทดสอบโดยมีจุดศูนย์กลางระยะลึจุด (ค่าของโพลดที่ตรงกับค่ารับแต่ละจุดสำคัญแสดงไว้ [N]) (Kater & Szatkiewicz, 2020)



รูปที่ 47 ลักษณะความยืดหยุ่นในการรับแรงดัดของคานทดสอบที่แรงกระทำสูงสุดครั้งแรก (Katzer & Szatkiewicz, 2020)



รูปที่ 48 ลักษณะความยืดหยุ่นในการรับแรงดัดของคานทดสอบที่สำหรับ V150 (Katzer & Szatkiewicz, 2020)



รูปที่ 49 ลักษณะความยืดหยุ่นในการรับแรงดัดของคานทดสอบที่สำหรับ  $V/75$  (Katzer & Szatkiewicz, 2020)

### 2.8.2 Performance of concrete beam reinforced with 3D printed Bioinspired primitive scaffold subjected to three-point bending (Nguyen-Van et al., 2022)

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงความแข็งแรงในการรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่ใช้การเสริมแรงแบบ TPMS-Primitive ที่เป็นพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกที่ใช้คือ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ในการพิมพ์ 3 มิติ แทนการเสริมแรงด้วยเหล็กกล้าแบบปกติทำให้สามารถลดปัญหาการกัดกร่อนได้ การใช้ ABS ที่มีอัตราส่วนร้อยละ 33.7 ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงไปร้อยละ 22 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้จำกัดขอบเขตการเสริมแรงด้วย ABS ที่ร้อยละ 10 โดยมีคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์ และ ABS แสดงดังตารางที่ 9 และ 10 ตามลำดับ และองค์ประกอบของการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 9 คุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์ (Nguyen-Van et al., 2022)

ขนาดตัวอย่าง (มิลลิเมตร)	แรง กระทำ สูงสุด (นิวตัน)	กำลังรับ แรงอัด (เมกะ ปาสคาล)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (เมกะ ปาสคาล)	โมดูลัส ยืดหยุ่น, $E$ (เมกะ ปาสคาล)	หน่วย น้ำหนัก, $\rho$ (กก./ลบ. ม.)	อัตรา ส่วนปัวซอง , $\nu$
50×50×50	88,978	35.59	±2.5	2,500	2,200	0.2

ตารางที่ 10 คุณสมบัติเชิงกลของ ABS (Nguyen-Van et al., 2022)

ความถ่วงจำเพาะ	โมดูลัสยืดหยุ่น, $E$ (เมกกะปาสคาล)	อัตราส่วนปัวซอง, $\nu$	ความเค้นที่จุดคราก (เมกกะปาสคาล)
1.05	2,200	0.35	56

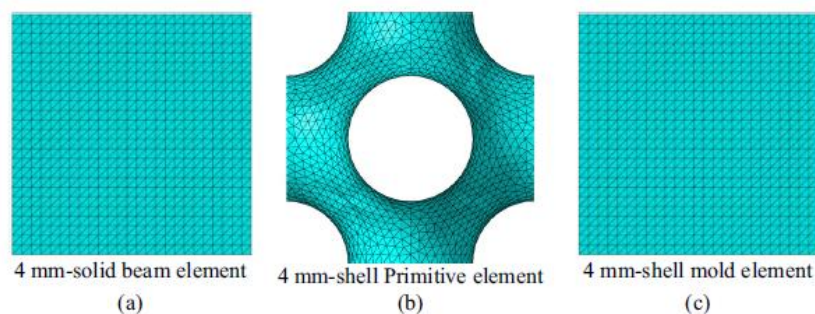
ตารางที่ 11 องค์ประกอบของการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ (Nguyen-Van et al., 2022)

ปูนซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)	เถ้าลอย (Class F) (กก./ลบ.ม.)	น้ำ (กก./ลบ.ม.)	ทราย (กก./ลบ.ม.)	PCE admixture (กก./ลบ.ม.)	PVA fiber (กก./ลบ.ม.)
550	650	400	550	8.45	0.25% โดย ปริมาตร

เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้จะเป็นรูปแบบ FDM ที่มีขนาดของหัวฉีดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตร ความเร็วในการพิมพ์อยู่ที่ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิการอัดรีดใช้ 245 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแท่นพิมพ์ใช้ 90 องศาเซลเซียสโดยความหนาที่ใช้พิมพ์ของแต่ละชั้น คือ 0.20 มิลลิเมตร และพิจารณาการรับแรงเชิงพื้นที่แบบร้อยละ 100 สำหรับการพิมพ์ชิ้นงาน ดังนั้น จะมีการทดสอบที่เกี่ยวข้องครั้งนี้จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

(1) การทดสอบแรงอัด: ใช้ตัวอย่างที่เป็นลูกบาศก์ที่มีขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร โดยแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ แสดงดังรูปที่ 50

(2) การทดสอบแรงดัด: ใช้ตัวอย่างที่มีขนาด 50x50x250 มิลลิเมตร ซึ่งถ้าเป็นคานรูปแบบ TPMS Primitive จะใช้องค์ประกอบของ ABS ร้อยละ 10 โดยสามารถแบ่งคานที่ใช้ทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้



Optimal mesh of (a) cement-based beam; (b) TPMS-Primitive shell; (c) beam mold.

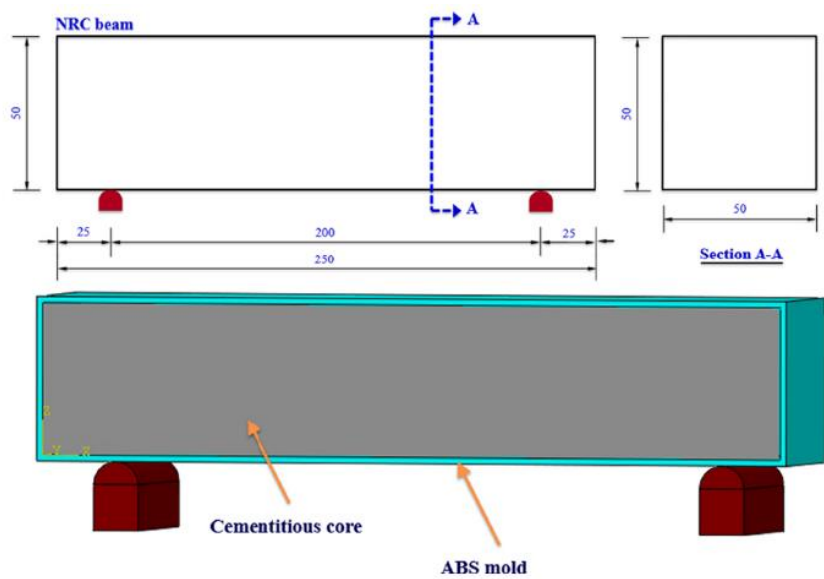
รูปที่ 50 ลักษณะการพิมพ์ตัวอย่างเป็นลูกบาศก์ (Nguyen-Van et al., 2022)



(2.1) คานซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ไม่มีการเสริมแรง (NRC beam) ที่มีการพิมพ์ ABS เป็นแม่พิมพ์แบบโดยแสดงดังรูปที่ 51

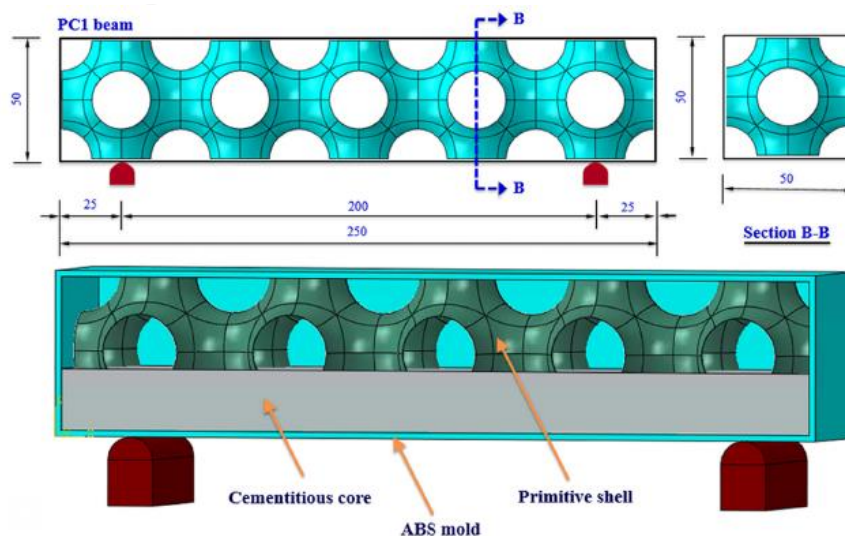
(2.2) คานซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เสริมแรงแบบ TPMS Primitive แบบชั้นเดียว (PC1 beam) ที่มีการพิมพ์ ABS เสริมแรงแบบ 5 หน่วย โดยแสดงดังรูปที่ 52

(2.3) คานซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เสริมแรงแบบ TPMS Primitive แบบสองชั้น (PC2 beam) ที่มีการพิมพ์ ABS เสริมแรงชั้นละ 20 หน่วย รวมทั้งหมด 40 หน่วย โดยแสดงดังรูปที่ 53



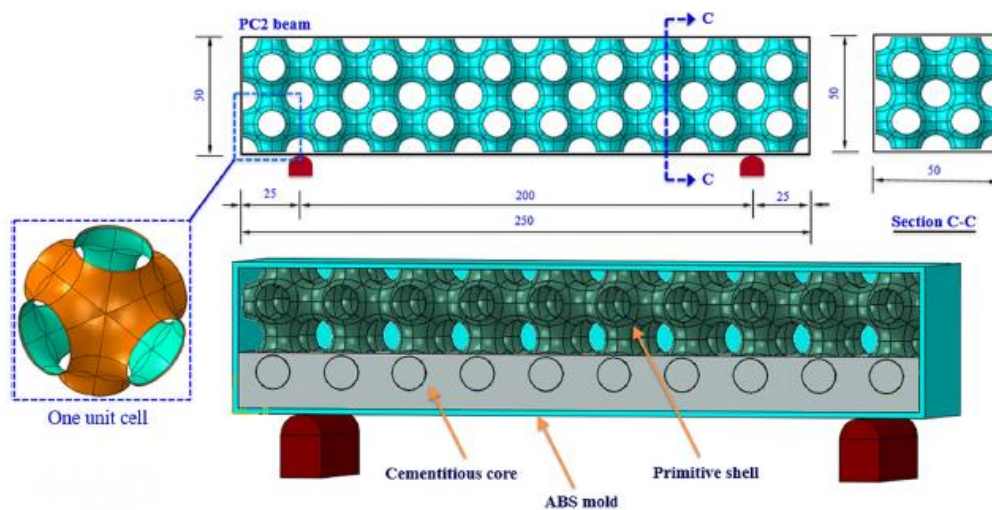
รูปที่ 51 ลักษณะการพิมพ์ NRC beam (Nguyen-Van et al., 2022)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 52 ลักษณะการพิมพ์ PC1 beam (Nguyen-Van et al., 2022)

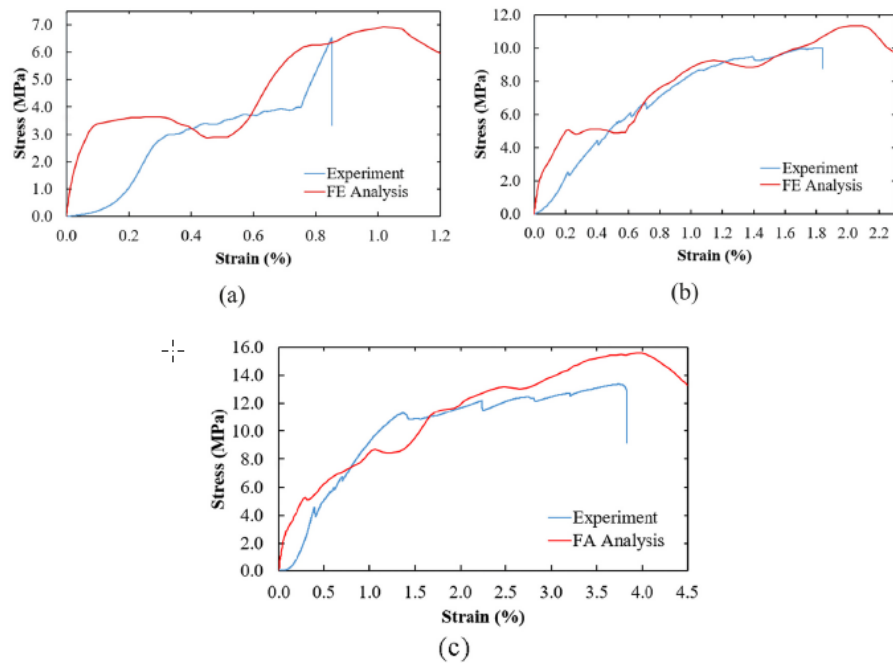




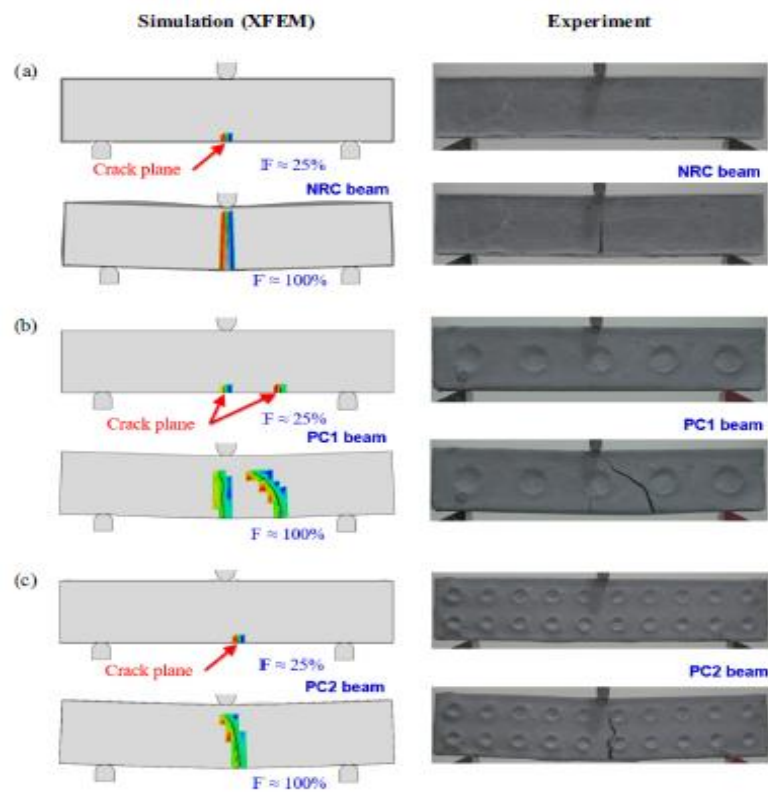
รูปที่ 53 ลักษณะการพิมพ์ PC2 beam (Nguyen-Van et al., 2022)

เมื่อทดสอบจากตัวอย่างของชิ้นงานและนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ซึ่งมีแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ ได้แก่ แบบจำลอง Simplified cementitious damage plasticity (SCDP) ที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการแรงยึดเหนี่ยวของแรงของแรงอัดและแรงดึง โดยใช้แบบจำลอง Extended finite element method (XFEM) ที่ใช้ในการวิเคราะห์รอยแตกของวัสดุ และการวิเคราะห์แรงตัดในคานจะใช้แบบจำลอง Finite element (FEM) ผลลัพธ์จากการทดสอบและการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบกันมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 3 ถึง 7 และผลจากการทดสอบตัวอย่างที่เป็นลูกบาศก์สามารถรับแรงอัดได้สูงสุด คือ 36 เมกกะปาสคาล ที่ระยะเวลา 28 วัน เมื่อวิเคราะห์การกระจายความเค้นของ Von Mises จากคานตัวอย่างทั้ง 3 ลักษณะ พบว่าสามารถรับความเค้นสูงสุดของ NRC beam, PC1 beam และ PC2 beam มีค่า 43 59 และ 82 เมกกะปาสคาล เมื่อพิจารณาแรงตัดในคานตัวอย่างและนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของการวิเคราะห์ FEM และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 54 จะพบว่าการเสริมแบบ PC1 และ PC2 ให้ความต้านทานต่อการแตกหัก และมีค่าความเหนียวที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับ NRC beam และลักษณะรอยแตกที่สร้างขึ้นใน TPMS Primitive ได้รับความเสียหายส่วนใหญ่ตรงกลาง ดังนั้น อาจจะมีการปรับความหนาแน่นของการเสริมแรงให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และลักษณะรอยแตกที่สร้างขึ้นตัวอย่างที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 55 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการวิเคราะห์ FEM และการทดสอบมีความสอดคล้องกัน ลักษณะรอยแตกที่สร้างขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การโก่งตัวและแรงเฉือน

การศึกษาและวิจัยครั้งนี้จะเกี่ยวข้องกับกรณีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อพิมพ์รูปแบบของคานที่คำนึงถึงสภาพการใช้งานจริงในประเทศไทย โดยยึดหลักการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (SDM) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงตัดของคานช่วงเดียว



รูปที่ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain)  
 (a) NRC beam (b) PC1 beam และ (c) PC2 beam (Nguyen-Van et al., 2022)



รูปที่ 55 ลักษณะรอยแตกที่ตรวจพบจากการวิเคราะห์ FEM และการทดสอบตัวอย่าง  
 (a) NRC beam (b) PC1 beam และ (c) PC2 beam (Nguyen-Van et al., 2022)

## 2.9 ช่องว่างของงานวิจัยที่ผ่านมา

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าไม้แบบจะทำหน้าที่เป็นแบบสำหรับหล่อชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ และจะถูกถอดถอนออกเมื่อเสร็จสิ้นการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มาใช้สำหรับพิมพ์กรอบแบบแทนการใช้ไม้แบบ โดยใช้มอร์ตาร์เป็นวัสดุในการพิมพ์และเติมเนื้อคานด้วยคอนกรีต ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยในอดีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาคานที่ใช้กรอบแบบจากการพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยคาดการณ์ว่ากรอบแบบและคอนกรีตสามารถรับแรงกระทำร่วมกันได้



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุสำหรับการผลิตตัวอย่างคานให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง และคำนึงถึงความเหมาะสมของการก่อสร้าง โดยแสดงดังรูปที่ 56 และสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) มอร์ตาร์สำหรับพิมพ์กรอบแบบ
- 2) คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย เท่ากับ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ 27.47 เมกะปาสคาล ของแห่งทดสอบทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน
- 3) เสริมเหล็กข้ออ้อย DB16 ตามมาตรฐาน มอก.24 (2559) ชั้นคุณภาพ SD-40
- 4) เสริมเหล็กปลอกด้วยเหล็กกลม RB6 ตามมาตรฐาน มอก.20 (2559) ชั้นคุณภาพ SD-24
- 5) กรอบไม้แบบคานคอนกรีตปกติ (Normal beam, NB)
- 6) Strain gauge สำหรับติดเหล็ก
- 7) Strain gauge สำหรับติดที่ผิวคอนกรีต
- 8) ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer, LVDT)



1) มอร์ตาร์สำหรับพิมพ์  
กรอบแบบ



2) คอนกรีต



3) เหล็กข้ออ้อย DB16



4) เหล็กกลม RB6



5) กรอบไม้แบบ



6) Strain gauge สำหรับ  
ติดเหล็ก



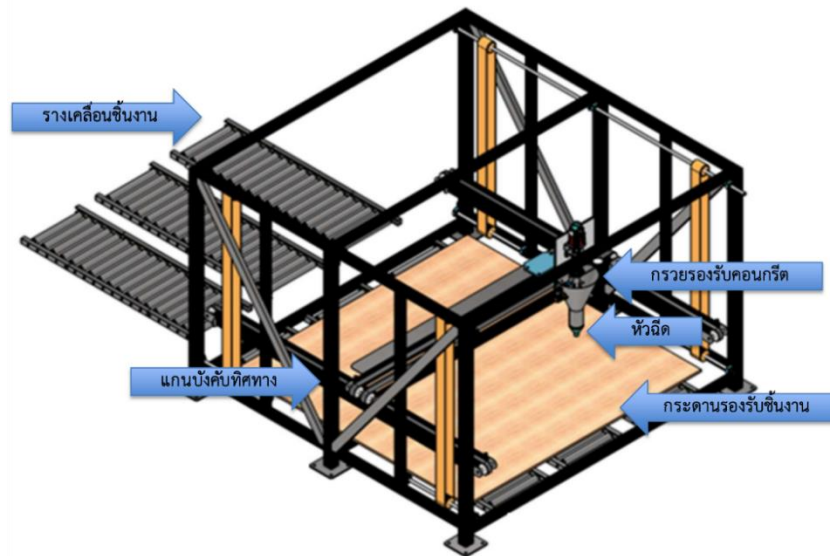
7) Strain gauge สำหรับ  
ติดที่ผิวคอนกรีต



8) Linear Variable  
Differential  
Transformer (LVDT)

**รูปที่ 56 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย**

3.1.2 เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) ใช้สำหรับพิมพ์  
กรอบแบบคาน แสดงดังรูปที่ 57



รูปที่ 57 ตัวอย่างเครื่องพิมพ์แบบ FDM

58

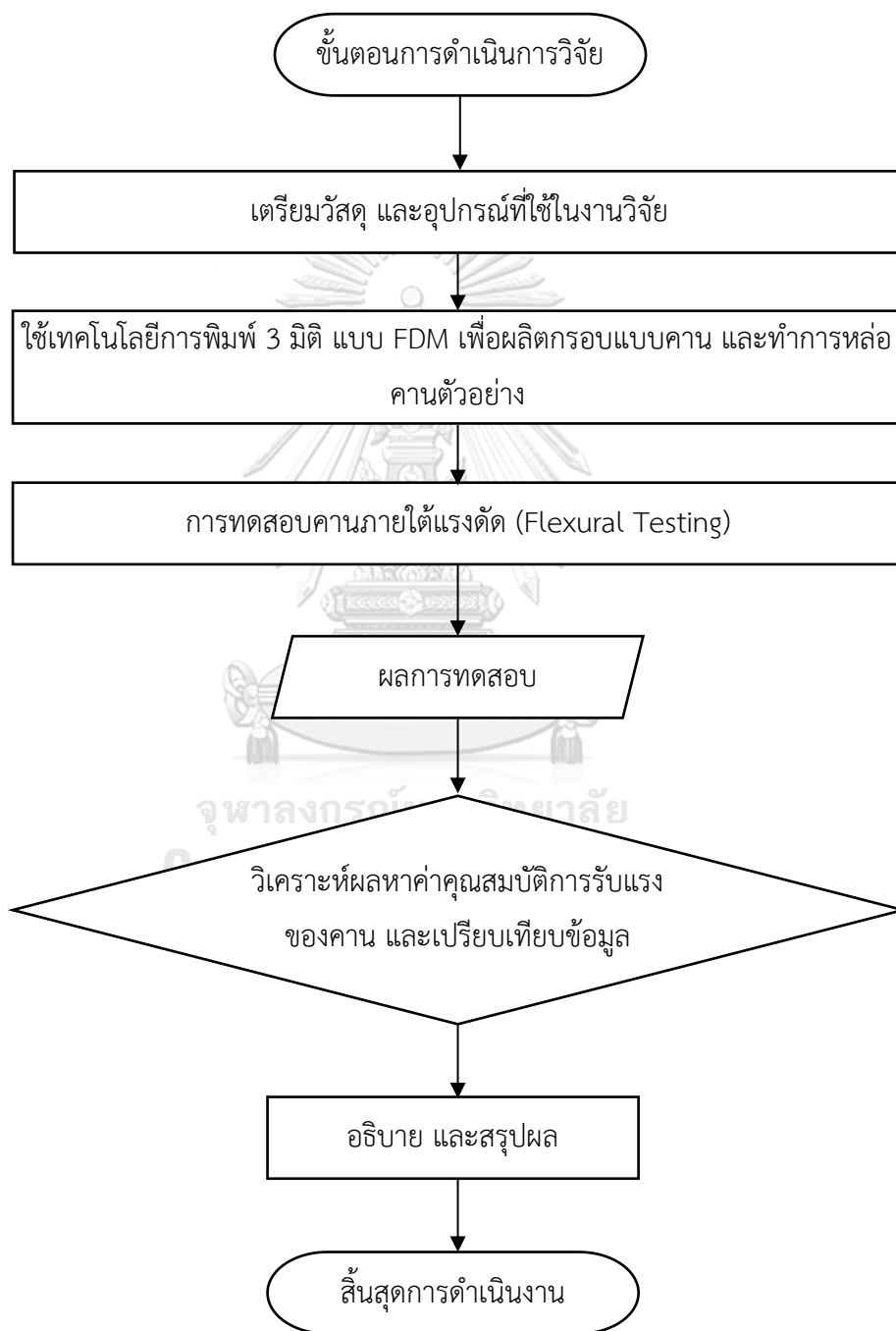
3.1.3 เครื่องทดสอบคานภายใต้แรงดัด (Flexural Testing Machine) แสดงดังรูปที่



รูปที่ 58 Flexural Testing Machine

### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการผลิตคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM และนำมาทดสอบด้วยวิธีการทดสอบคานภายใต้แรงดัดที่เกิดขึ้น เพื่อศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงของคาน และลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 59



รูปที่ 59 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



### 3.2.1 เตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สถานที่ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริษัท เอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด เพื่อจัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการผลิตตัวอย่างคาน โดยสามารถสรุปรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบได้ดังนี้

#### 3.2.1.1 มอร์ตาร์สำหรับพิมพ์กรอบแบบ

มอร์ตาร์สำหรับพิมพ์กรอบแบบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีคุณสมบัติการรับกำลังอัด ประลัย และคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์แสดงดังตารางที่ 12 และ 13 ตามลำดับ

ตารางที่ 12 คุณสมบัติการรับกำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์

ขนาด ตัวอย่าง (เซนติเมตร)	ความสามารถในการ ต้านทานแรงกระทำ (กิโลนิวตัน)	อายุบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (เมกกะปาสคาล)
5.0x5.0x5.0	115.43	1	46.17
5.0x5.0x5.0	207.48	7	82.99
5.0x5.0x5.0	251.23	28	100.49

ตารางที่ 13 คุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์

คุณสมบัติ	หน่วย	ความต้านทาน แรงกระทำ	มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง
ระยะเวลาก่อตัว	นาที	110-150	ASTM C807 (2021)
กำลังรับแรงอัด	เมกกะปาสคาล	$\geq 80$	ASTM C109/C109M (2021)
กำลังดึงแยก	เมกกะปาสคาล	2.1	ASTM C496/C496M (2017)
กำลังรับแรงดัด	เมกกะปาสคาล	12	ASTM C348 (2021)

#### 3.2.1.2 คอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้ได้สนใจกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วันของแท่งทดสอบ ทรงกระบอก มีค่าเท่ากับ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ 27.46 เมกกะปาสคาล และคอนกรีตที่ใช้สำหรับงานก่อสร้างคานตามมาตรฐานทั่วไปกำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อน

ในค่าการยุบตัวของคอนกรีต เท่ากับ  $10.0 \pm 2.5$  เซนติเมตร โดยมีคุณสมบัติการรับกำลังอัด  
ประลัย แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 คุณสมบัติการรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ขนาดตัวอย่าง (เซนติเมตร) เส้นผ่านศก. × ความสูง	ความต้านทาน แรงกระทำ (กิโลนิวตัน)	อายุบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)
15.18 × 30.19	368.07	7	20.33
15.17 × 30.47	407.57	14	22.54
15.19 × 30.33	509.57	28	28.10

3.2.1.3 เสริมเหล็กข้ออ้อย DB16 ตามมาตรฐาน มอก.24 (2559) ที่ชั้นคุณภาพ SD-40

การศึกษานี้ได้ออกแบบการเสริมแรงของวัสดุตามมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (SDM) วสท.011008-21 (2564) ได้แก่ การออกแบบเสริมเหล็กข้ออ้อย DB16 เพื่อรับแรงดัดที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างตามข้อกำหนดการเสริมเหล็กชั้นต่ำต้งสมการที่ 3.1 และมีคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแสดงดังตารางที่ 15

$$A_{s_{min}} = \frac{0.25\sqrt{f'_c}bd}{f_y} \geq \frac{1.4}{f_y}bd \quad (3.1)$$

เมื่อ  $b$  คือ ความกว้างคาน (มิลลิเมตร)  
 $d$  คือ ความลึกประสิทธิภาพของคาน (มิลลิเมตร)  
 $f'_c$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)  
 $f_y$  คือ กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (เมกะปาสคาล)

3.2.1.4 เสริมเหล็กปลอกด้วยเหล็กกลม RB6 ตามมาตรฐาน มอก.20 (2559) ที่ชั้นคุณภาพ SD-24

การศึกษานี้ได้ออกแบบการเสริมแรงของวัสดุตามมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (SDM) วสท.011008-21 (2564) ได้แก่ การออกแบบเสริมเหล็กปลอกด้วยเหล็กกลม RB6 เพื่อรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างตามข้อกำหนดการเสริมเหล็กชั้นต่ำต้งสมการที่ 3.2 และมีคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแสดงดังตารางที่ 15



$$A_{v_{\min}} = \frac{0.062\sqrt{f'_c}bs}{f_{yt}} \geq \frac{0.35}{f_{yt}}bs \quad (3.2)$$

เมื่อ	$b$	คือ	ความกว้างคาน (มิลลิเมตร)
	$s$	คือ	ระยะเสริมเหล็กปลอก (มิลลิเมตร)
	$f'_c$	คือ	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)
	$f_{yt}$	คือ	กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมด้านขวาง (เมกะปาสคาล)

### ตารางที่ 15 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริม

วัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กิโลกรัมต่อเมตร)	กำลังรับแรงดึง (เมกะปาสคาล)	กำลังคราก (เมกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_s$ ; เมกะปาสคาล)
เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (RB6)	0.6	0.222	385*	235*	200*
เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร (DB16)	1.6	1.578	560*	390*	200*

หมายเหตุ : \* มอก.20 (2559)-2543 สำหรับเหล็กกลมและ มอก.24 (2559)-2536 สำหรับเหล็กข้ออ้อย

#### 3.2.1.5 กรอบไม้แบบคานคอนกรีตปกติ (NB)

กรอบไม้แบบคานคอนกรีตปกติ (NB) ที่ใช้ในงานศึกษาค้างนี้มีขนาดกว้าง (B) x สูง (H) x ยาว (L) เท่ากับ 20 X 50 X 170 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 60



รูปที่ 60 กรอบไม้แบบคานคอนกรีตปกติ (NB)

### 3.2.1.6 Strain gauge สำหรับติดเหล็ก

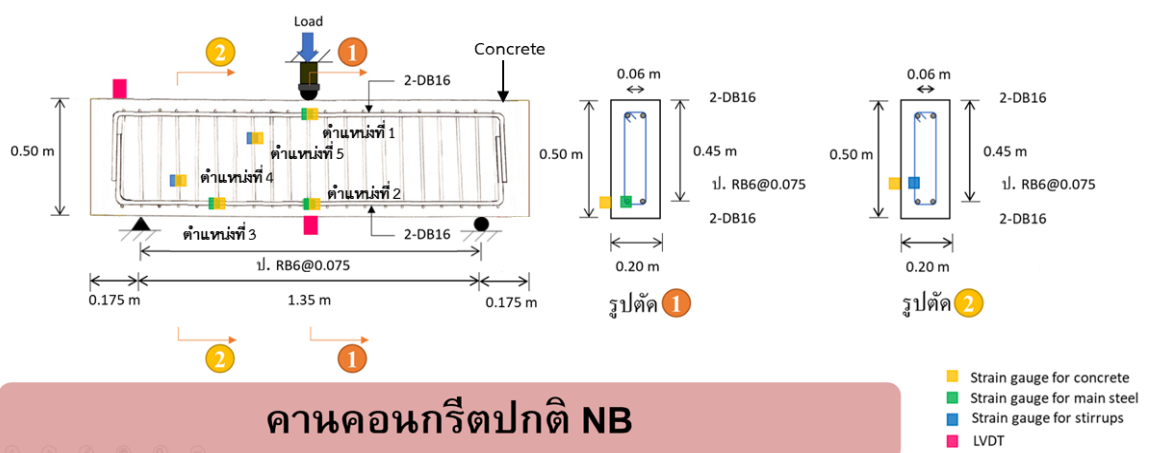
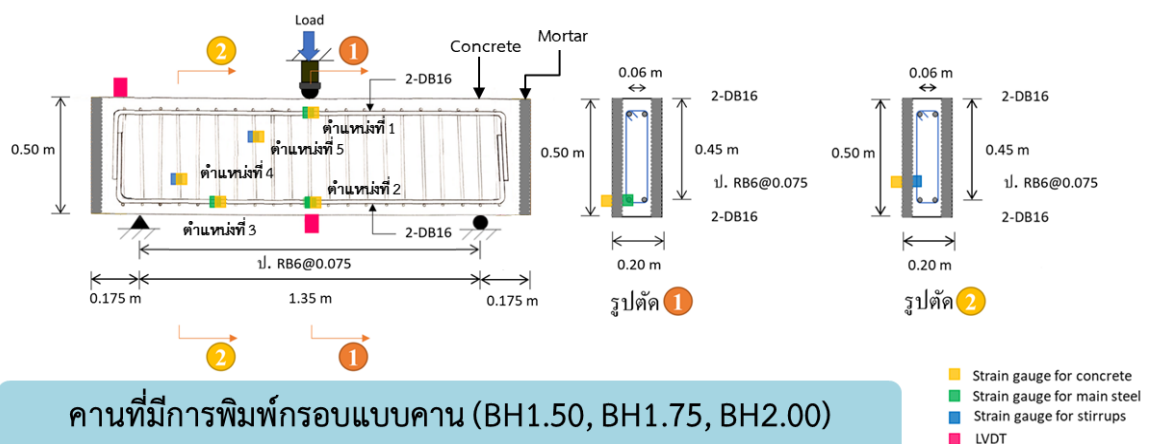
เมื่อทำการผูกเหล็กคานจนแล้วเสร็จจะทำการติดตั้ง Strain gauge สำหรับติดเหล็กเพื่อวัดค่าแรงดึงเครียด (strain) ที่เกิดขึ้น โดยมีตำแหน่งการติดตั้ง และลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 61 และรูปที่ 62(ก) ตามลำดับ

### 3.2.1.7 Strain gauge สำหรับติดที่ผิวคอนกรีต

หลังจากการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อจนแล้วเสร็จจะทำการติดตั้ง Strain gauge สำหรับติดที่ผิวคอนกรีตเพื่อวัดค่าแรงดึงเครียด (strain) ที่เกิดขึ้น โดยมีตำแหน่งการติดตั้ง และลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 61 และ 62(ข) ตามลำดับ

### 3.2.1.8 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

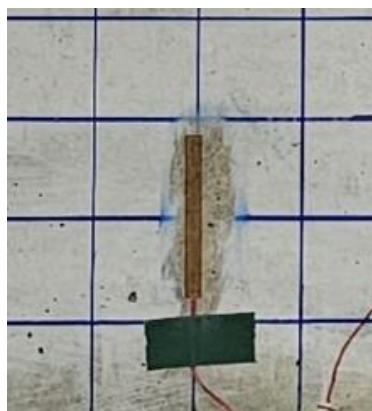
LVDT เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าการโก่งตัวของวัสดุที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำ ดังนั้นการศึกษานี้ได้กำหนดการทดสอบของคานตัวอย่างที่มีอายุครบ 28 วัน โดยมีตำแหน่งการติดตั้ง และลักษณะตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 61 และ 62(ค) ตามลำดับ



รูปที่ 61 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์



(ก) การติดตั้ง Strain gauge  
สำหรับติดเหล็ก



(ข) การติดตั้ง Strain gauge  
สำหรับติดที่ผิวคอนกรีต



(ค) การติดตั้ง LVDT

### รูปที่ 62 ตัวอย่างลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์

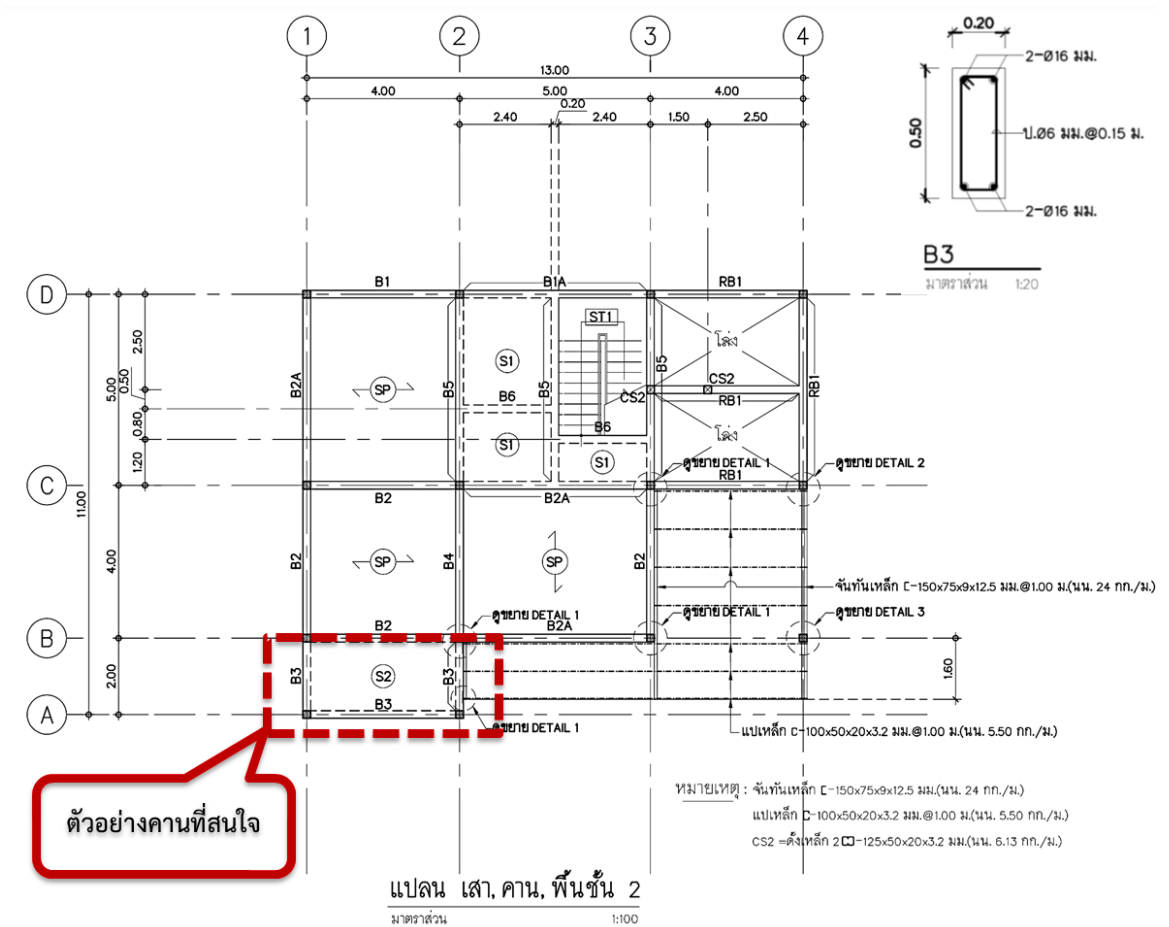
#### 3.2.2 การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อผลิตตัวอย่างคาน

งานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาตัวอย่างบ้านอาคาร 2 ชั้นของกรมโยธาธิการและผังเมืองในโครงการแบบบ้านसानฝันของขวัญปีใหม่คนไทยมีความสุข ได้แก่ แบบบ้านอารยสถาปัตย์ 3 และเลือกศึกษาเฉพาะคานชั้นที่ 2 บริเวณระเบียงแสดงดังรูปที่ 63 ที่มีขนาดกว้าง (B) x สูง (H) x ยาว (L) เท่ากับ 20 X 50 X 230 เซนติเมตร แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดความสามารถในการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์แบบ FDM ที่ไม่สามารถพิมพ์ตามขนาดความยาวตามความยาวจริงในแบบก่อสร้างได้ จึงจำเป็นต้องลดขนาดของคานตัวอย่างให้มีขนาด B x H x L เท่ากับ 20 X 50 X 170 เซนติเมตร โดยมีการหล่อคานคอนกรีตปกติ (NB) ที่ออกแบบโดยวิธีกำลัง และการพิมพ์กรอบแบบคานเป็นรูปแบบกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีกรณีศึกษาชั้นความสูง (h) ของกรอบพิมพ์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ h = 15.0 มิลลิเมตร (BH1.50) h = 17.5 มิลลิเมตร (BH1.75) และ h = 20.0 มิลลิเมตร (BH2.00) เมื่อทำการผูกเหล็กคาน และติดตั้ง Strain gauge ที่ผิวเหล็กแล้วเสร็จให้นำมาใส่ในกรอบแบบแสดงดังรูปที่ 64 และเทคอนกรีต ดังนั้นรายละเอียดขนาดของคานตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 16 และมีขั้นตอนการพิมพ์คาน พร้อมกับการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 65 เมื่อทำการหล่อคานตัวอย่างเสร็จสิ้นแล้วจะทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วันก่อนทำการทดสอบ เพื่อให้เสมือนกับสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงที่เกิดขึ้น

#### ตารางที่ 16 ขนาดของคานตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความยาว (L)(เมตร)	ความกว้าง (B)(เมตร)	ความสูงของหน้าตัด (H)(เมตร)	ความสูงของชั้นที่พิมพ์ (h)(เซนติเมตร)	ความหนาของชั้นที่พิมพ์ (t)(เซนติเมตร)
NB	1.70	0.20	0.50	50.00	-

ตัวอย่าง	ความยาว (L)(เมตร)	ความกว้าง (B)(เมตร)	ความสูงของหน้าตัด (H)(เมตร)	ความสูงของชั้นที่พิมพ์ (h)(เซนติเมตร)	ความหนาของชั้นที่พิมพ์ (t)(เซนติเมตร)
BH1.50	1.70	0.20	0.50	1.50	3.35
BH1.75	1.70	0.20	0.50	1.75	4.30
BH2.00	1.70	0.20	0.50	2.00	4.47



รูปที่ 63 ตำแหน่งของคานชั้นที่ 2 (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2562)





(ก) ลำดับที่ 1: ผูกเหล็กคาน

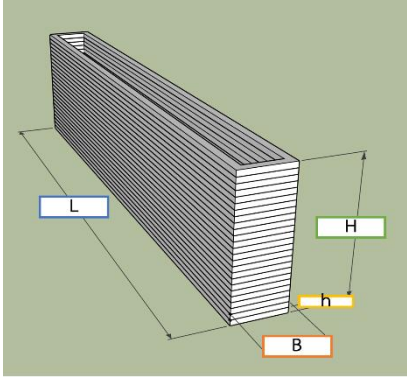

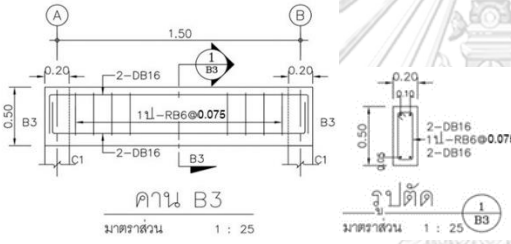

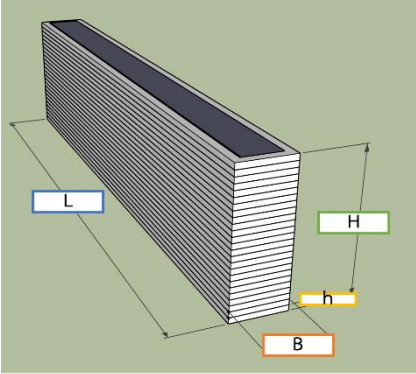



(ข) ลำดับที่ 2: การติดตั้ง Strain gauge สำหรับติดเหล็ก



(ค) ลำดับที่ 3: ยกเหล็กคานใส่ในกรอบแบบ

รูปที่ 64 ลำดับขั้นตอนการผูกเหล็กคาน และการติดตั้ง Strain gauge สำหรับติดเหล็ก

1. ลักษณะรูปแบบการพิมพ์	
	
ตัวอย่างงาน Model	ตัวอย่างชิ้นงานจริง
2. ลักษณะการเสริมเหล็ก	
	
ตัวอย่างงาน Model	ตัวอย่างชิ้นงานจริง
3. การเติมคอนกรีตในช่องว่างให้เต็ม	
	
ตัวอย่างงาน Model	ตัวอย่างชิ้นงานจริง

รูปที่ 65 ลักษณะการขึ้นรูปของคาน

### 3.2.3 การทดสอบแรงดัด (Bending Testing)

เมื่อหล่อคานตัวอย่างแต่ละรูปแบบแล้วเสร็จจะรอจนกระทั่งคานมีระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบหาแรงดัดของคานภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด เพื่อทดสอบหาค่าแรงดัดของคาน (Bending Testing) และการโก่งตัวของคานตัวอย่างที่เกิดขึ้นจริง พร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมการวิบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยสามารถสรุปขั้นตอนการเตรียมการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

- เมื่อทำการพิมพ์กรอบแบบจนได้ขนาดของคานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาด  $B \times H \times L$  เท่ากับ  $20 \times 50 \times 170$  เซนติเมตร ตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 16 แล้วจนเสร็จ

- ทำการติดตั้งสเตรนเกจสำหรับการวัดค่าการยืดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึง และเหล็กเหล็กปลอก แสดงดังรูปที่ 64

- นำเหล็กคานที่ผูกไว้ยกใส่ในกรอบแบบหล่อ และเทคอนกรีต

- เมื่อนำตัวอย่างคานมาบ่มด้วยอุณหภูมิห้องตามสภาพการใช้งานจริงจนกระทั่งมีระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน ของคอนกรีต

- ให้ทำการวัดขนาดของตัวอย่างคาน และจดบันทึกข้อมูล

- นำตัวอย่างคานมาวางบนเครื่องทดสอบที่บริเวณกึ่งกลางของแท่นเป็นลักษณะแนวนอน ให้หัวกดทดสอบอยู่บริเวณกึ่งกลางคาน

- ติดตั้งทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวนำแบบเชิงเส้น (LVDT) และติดตั้ง Stain gauge ที่ผิวบนคอนกรีตมีลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 61

- เปิดเครื่องทดสอบและทำการกดคานตัวอย่างจนกระทั่งเกิดการวิบัติ และทำการบันทึกค่าของน้ำหนักที่กดลง พร้อมทั้งสังเกตลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่าง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 การวิเคราะห์แรงกระทำโครงสร้างด้วยวิธีแบบแรงอัด-แรงดึง (Strut and Tie Method)

เมื่อทำการวิเคราะห์แรงกระทำโครงสร้างด้วยวิธีแบบแรงอัด-แรงดึง (Strut-Tie Method) โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบและการออกแบบด้วยวิธีกำลังที่พิจารณาเฉพาะความกว้างของเนื้อคานที่แท้จริง (b) ที่ไม่รวมกับกรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ เพราะฉะนั้นค่า b ของคาน NB BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 จะมีค่าเท่ากับ 200.00 133.00 114.00 และ 110.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์แรงกระทำดังตารางที่ 17 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณออกแบบโดยใช้สมการอย่างง่ายของ Nagarajan and Pillai (2008) เพื่อหาแรงกระทำที่เกิดขึ้นที่จุดรองรับ (R) เกิดจากการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนดั่งสมการที่ 2.51 และ 2.52 โดยค่า R จะถูกแทนด้วยตัวแปร  $P_1$  หรือ  $P_2$  เพื่อหาแรงกระทำที่มากที่สุด ( $P_{max} = 2P_1$ ) และการคำนวณแรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้นในคาน ลึกตามมาตรฐาน วสท.011008-21 (2564) เพื่อหาแรงกระทำที่มากที่สุดในสมการที่ 2.43 พบว่า  $P_{max}$  จากการทดสอบมีค่ามากกว่า  $P_{max}$  ที่ออกแบบตามสมการของ Nagarajan and Pillai (2008) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าร้อยละความแตกต่างของ  $P_{max}$  ระหว่างผลจากการทดสอบกับการออกแบบของคาน NB BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 มีค่าร้อยละ 44.04 55.69 61.92 และ 65.49 ตามลำดับ และค่าแรงเฉือนประลัย ( $V_u$ ) ตามมาตรฐาน วสท.011008-21 (2564) ที่ระบุไว้ว่า  $V_u$  จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $0.83\sqrt{f'_c}b_wd$  จะสังเกตได้ว่าค่าแรงเฉือนจากการทดสอบและออกแบบที่ได้มีค่าไม่เกินค่าดังกล่าว ซึ่งในการออกแบบการรับแรงกระทำของคานที่ใช้ทดสอบมีการออกแบบด้วยวิธีกำลังโดยพิจารณาคาน B3 ที่อยู่ระหว่างกริดที่ 1 และ 2 ที่มีความยาว 4.00 เมตร ดังที่แสดงแปลนอาคารบ้าน 2 ชั้นในรูปที่ 63 โดยออกแบบให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load, D) เท่ากับ 600 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load, L) เท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ปรากฏว่าค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 2,700 กิโลกรัม-เมตร และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 2,700 กิโลกรัม ( 26.49 กิโลนิวตัน) ดังนั้นตัวอย่างคานที่ทำการทดสอบทั้งหมดสามารถรับแรงกระทำได้มากกว่าที่ออกแบบใช้งานจริงในอาคารบ้าน 2 ชั้นที่ใช้เป็นแบบอย่าง

เมื่อพิจารณาคานที่ใช้กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ พบว่าความกว้างของเนื้อคานที่แท้จริง (b) มีขนาดที่แตกต่างกันจึงจะส่งผลต่อการคำนวณหา  $P_{max}$  ทำให้ได้ค่าน้อยกว่าคาน NB ที่มีค่า b มากกว่า นอกจากนี้พบว่าความสูงของชั้นกรอบแบบพิมพ์จะส่งผลโดยตรงต่อการรับแรง หรือความสูงของชั้นกรอบแบบพิมพ์แปรผันตรงกับแรงกระทำ โดยสังเกตได้แรงกระทำที่เกิดขึ้นจริงพบว่าคาน BH2.00 สามารถรับแรงกระทำได้มากกว่าคาน BH1.50 และ BH1.75 นอกจากนี้ยังพบว่าคานที่ใช้กรอบแบบ



พิมพ์ 3 มิติ มีปัญหาเรื่องของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุกรอบแบบพิมพ์และเนื้อคอนกรีตที่เดิมจึงจะส่งผลต่อการรับแรงกระทำที่แท้จริงเพราะกรอบแบบพิมพ์มีคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด 100.49 เมกะปาสคาล จึงไม่สามารถสรุปการรับแรงกระทำของคานที่ใช้กรอบแบบพิมพ์ได้อย่างแน่ชัดว่ามีคุณสมบัติช่วยรับแรงกระทำได้มากกว่าหรือน้อยเพียงใด จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุกรอบแบบพิมพ์และคอนกรีตที่เดิมเพื่อหาแรงกระทำที่แท้จริงของคานที่ใช้กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ

**ตารางที่ 17** การวิเคราะห์แรงกระทำโครงสร้างด้วยวิธีแบบแรงอัด-แรงดึง (Strut-Tie Structures)

ชื่อชิ้นงาน	การทดสอบ		Nagarajan and Pillai (2008)		วสท.011008-21 (2564)	
	แรงกระทำมากที่สุด ( $P_{max}$ ) (กิโลนิวตัน)	แรงเฉือนมากที่สุด ( $V_{max}$ ) (กิโลนิวตัน)	แรงกระทำมากที่สุด ( $P_{max}$ ) (กิโลนิวตัน)	แรงเฉือนมากที่สุด ( $V_{max}$ ) (กิโลนิวตัน)	แรงกระทำมากที่สุด ( $P_{max}$ ) (กิโลนิวตัน)	แรงเฉือนประลัย ( $V_u$ ) (กิโลนิวตัน)
NB	452.00	226.00	252.96	126.48	791.96	395.98
BH1.50	380.00	190.00	168.36	84.18	526.65	263.33
BH1.75	379.01	189.50	144.31	72.15	451.42	225.71
BH2.00	405.74	202.87	140.01	70.01	437.95	218.98

#### 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่ง (Load-Deflection Relationship)

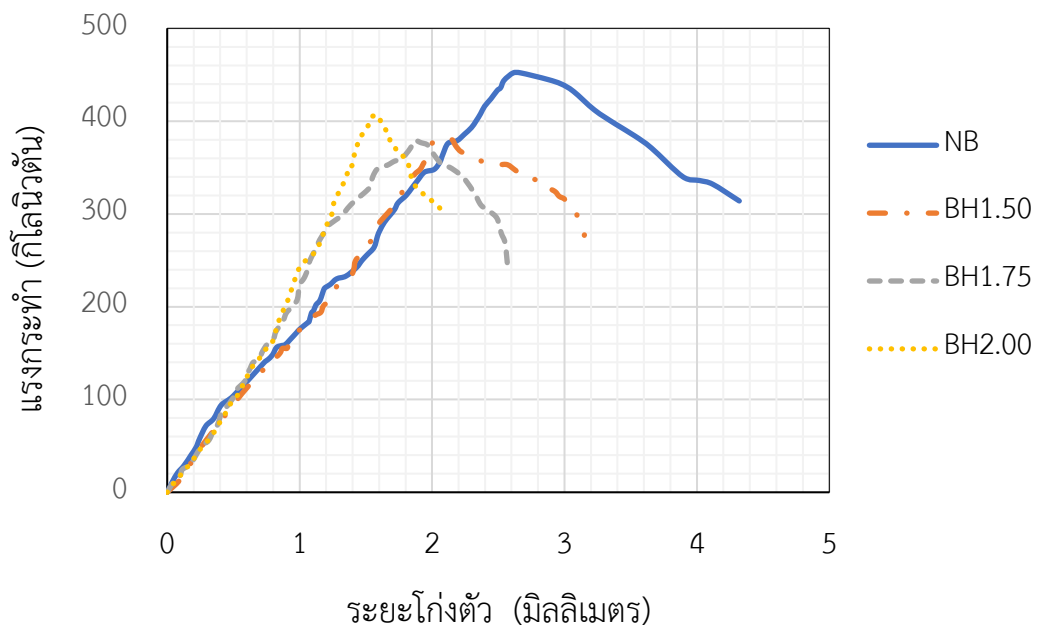
การศึกษานี้ทดสอบด้วยคานตัวอย่าง 4 รูปแบบ ได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อ้างอิง (NB) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติ จะประกอบด้วยคานที่มีชั้นความสูง 15.0 มิลลิเมตร มีจำนวน 34 ชั้น (BH1.50) ชั้นความสูง 17.5 มิลลิเมตร มีจำนวน 29 ชั้น (BH1.75) และชั้นความสูง 20.0 มิลลิเมตร มีจำนวน 25 ชั้น (BH2.00) โดยผลลัพธ์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งของคานแต่ละรูปแบบแสดงดัง**ตารางที่ 18** และ**รูปที่ 66** พบว่าคานที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติทั้งหมดรับแรงกระทำได้น้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อ้างอิงอยู่ในช่วงร้อยละ 10.23 ถึง 16.15 แต่ทั้งหมดมีรูปแบบของความสัมพันธ์ที่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน

คานทั้ง 2 แบบ (คานอ้างอิง และ คานที่ใช้การพิมพ์คอนกรีต 3 มิติเป็นแบบหล่อ) มีการเปลี่ยนรูปที่ต่างกันโดยคาน NB มีค่าการโก่งตัวที่มากกว่าคาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 คิดเป็นร้อยละ 27.08 40.51 และ 52.31 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงความชัน (Slope) ของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งของคานทั้งหมดพบว่าคานที่ใช้กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ ทั้งหมดเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่าง BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 พบว่าความสูงของชั้นที่พิมพ์ส่งผลต่อความชันหรือความสูงของชั้นที่พิมพ์แปรผันตรงกับค่าความชัน ซึ่งจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุและความแข็งแกร่งของโครงสร้าง โดยความชันที่มากจะแสดงถึงความต้านทานต่อแรงกระทำที่ดีหรือ

การรับกำลังอัดที่มากขึ้น ความยืดหยุ่นของวัสดุและความเหนียวน้อย และสังเกตได้ว่าความชันของคาน NB และ BH1.50 มีค่าที่น้อยกว่าคาน BH1.75 และ BH2.00 เพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 18 ผลลัพธ์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งของคานแต่ละรูปแบบ

ชื่อชิ้นงาน	แรงกระทำมากที่สุด ( $P_{max}$ ) (กิโลนิวตัน)	แรงเฉือนมากที่สุด ( $V_{max}$ ) (กิโลนิวตัน)	การโก่งมากที่สุด ( $\Delta_{max}$ ) (มิลลิเมตร)	ร้อยละความแตกต่าง	
				แรงกระทำ	การโก่ง
NB	452.00	226.00	4.32	-	-
BH1.50	380.00	190.00	3.15	15.93	27.08
BH1.75	379.01	189.50	2.57	16.15	40.51
BH2.00	405.74	202.87	2.06	10.23	52.31



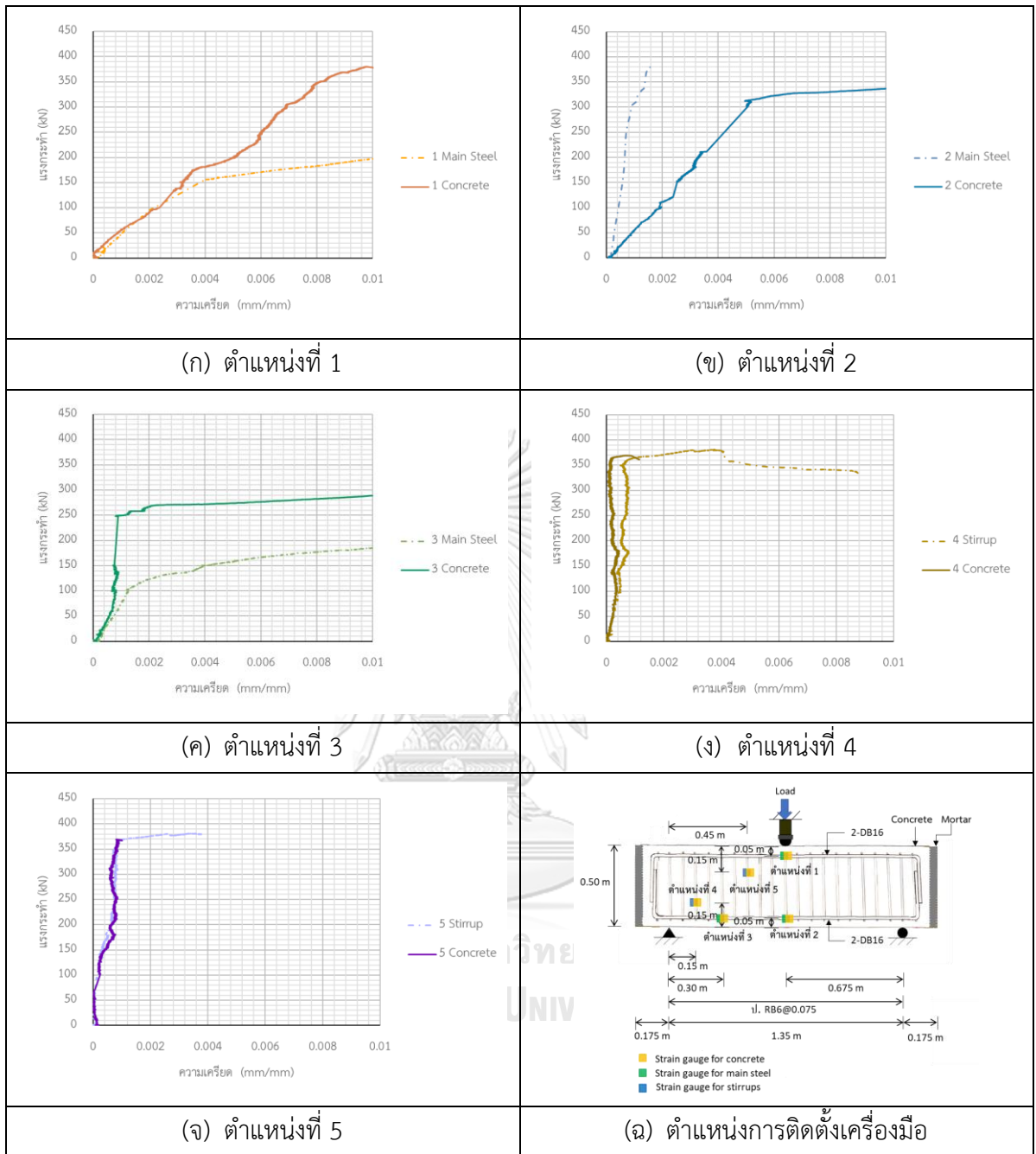
รูปที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งของคาน

### 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียด (Load-Strain Relationship)

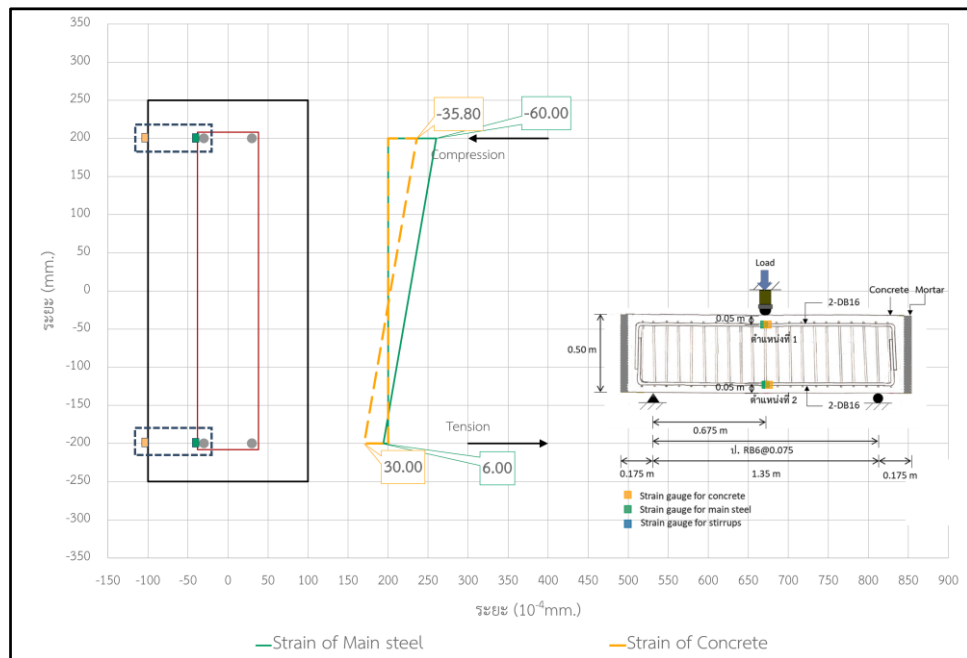
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดเลือกพิจารณาเฉพาะคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ เพื่อศึกษาการกระจายความเครียดที่เกิดขึ้นในกรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ และเนื้อคอนกรีตภายในว่าภายในหน้าตัดคานวัสดุกรอบแบบพิมพ์และเนื้อคอนกรีตภายในรวมเป็นวัสดุเดียวกันได้หรือไม่ โดยการทดลองนี้ได้ติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดที่ผิวของคอนกรีตหรือกรอบแบบพิมพ์ 3 มิติและผิวของเหล็กเสริมและเหล็กปลอกจะประกอบด้วย 5 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะมีการติดตั้งเครื่องมือที่ตำแหน่งตรงกัน และผลลัพธ์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของ BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 เพื่อพิจารณาค่าแห่งของความเครียดที่เกิดขึ้นทั้ง 5 ตำแหน่ง ของกรอบแบบพิมพ์และเหล็กเสริม

คาน BH1.50 เมื่อสังเกตตำแหน่งที่ 1 ถึง 3 เป็นตำแหน่งที่ติดตั้งบริเวณเหล็กเสริมพบว่า **รูปที่ 67(ก)** ความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม ณ ตำแหน่งที่ 1 ในช่วงเริ่มต้นจนกระทั่งแรงกระทำมีค่าเท่ากับ 133.57 กิโลนิวตัน มีลักษณะที่คล้ายกัน แต่เมื่อเพิ่มแรงกระทำมากขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันของวัสดุทั้งสอง และ **รูปที่ 67(ข)** และ **รูปที่ 67(ค)** พบว่ากรอบแบบและคอนกรีตที่เติมมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะโก่งที่ไม่สอดคล้องกันในตำแหน่งที่ 2 และ 3 นอกจากนี้เครื่องมือวัดความเครียดที่ติดตั้งบริเวณเหล็กปลอกจะตรงกับตำแหน่งที่ 4 และ 5 แสดงดัง **รูปที่ 67(ง)** และ **รูปที่ 67(จ)** เป็นความเครียดของคอนกรีตที่ตำแหน่งที่ 4 และ 5 มีค่าน้อยกว่าความเครียดของคอนกรีตที่ใช้งานทั่วไปที่มีความเครียดของคอนกรีตอยู่ที่ 0.003 กล่าวคือคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเมื่อได้รับแรงอัดในขณะที่เหล็กยังสามารถรับแรงอัดต่อไปได้

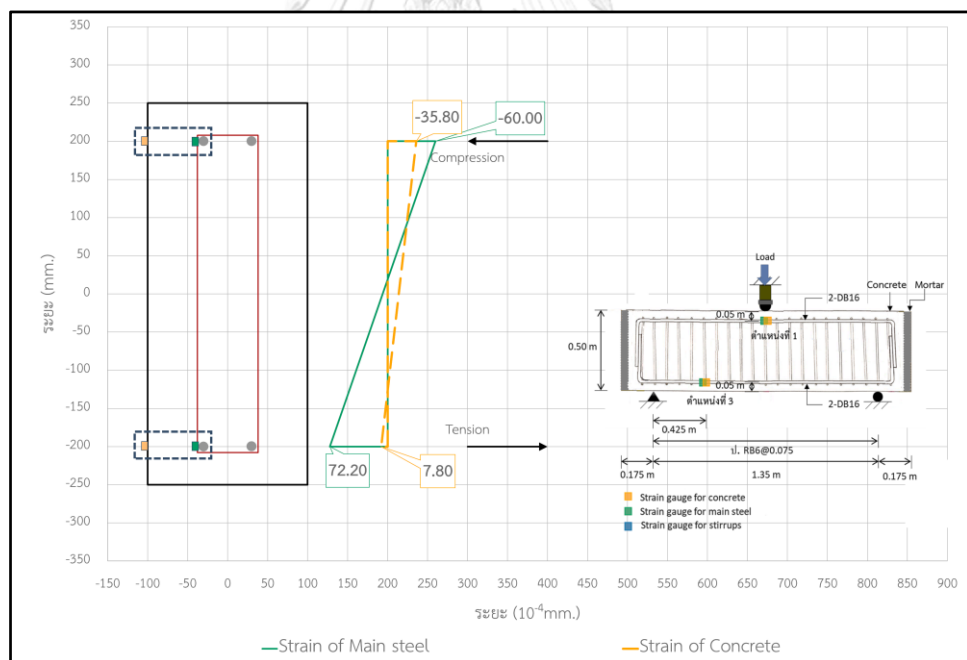
เมื่อพิจารณาแรงกระทำที่ค่าความเครียดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 ตรงตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH1.50 มีค่าเท่ากับ 173.45 กิโลนิวตัน การกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 1 กับ 2 และตำแหน่งที่ 1 กับ 3 ของหน้าตัดคาน BH1.50 แสดงดัง **รูปที่ 68(ก)** และ **รูปที่ 68(ข)** พบว่าความเครียดของเหล็กกับคอนกรีตไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และเหล็กปลอกที่ตำแหน่งที่ 4 เกิดการหดตัวมากกว่าคอนกรีต แต่เหล็กปลอกที่ตำแหน่งที่ 5 เกิดการหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตแสดงดัง **รูปที่ 68(ค)** และการกระจายเครียดทั้ง 5 ตำแหน่งตามความยาวของคานแสดงดัง **รูปที่ 69** พบว่าเกิดการกระจายความเครียดตำแหน่งที่ 4 และ 5 บริเวณเหล็กปลอกเกิดการหดตัวของกรอบแบบพิมพ์และเหล็กปลอก ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการวิบัติของคานลิกที่มีมักจะเกิดการจากแรงเฉือน



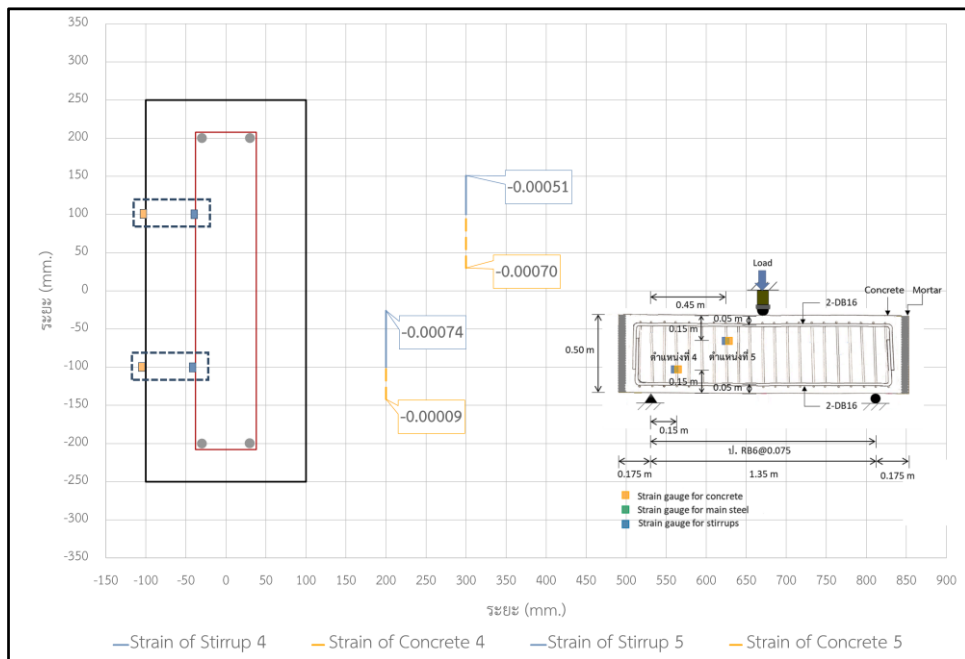
รูปที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน BH1.50



(ก) การกระจายความเคียดที่ตำแหน่ง 1 และ 2

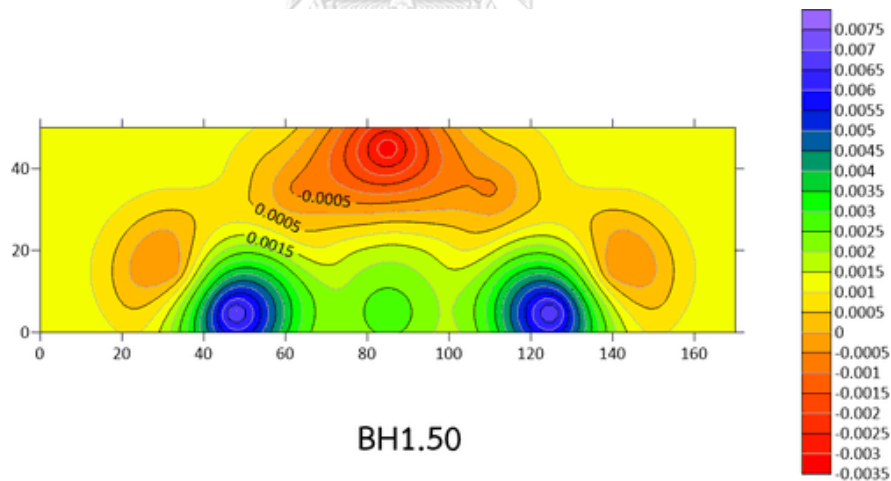


(ข) การกระจายความเคียดที่ตำแหน่ง 1 และ 3



(ค) การกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 4 และ 5

รูปที่ 68 การกระจายความเครียดของคาน BH1.50

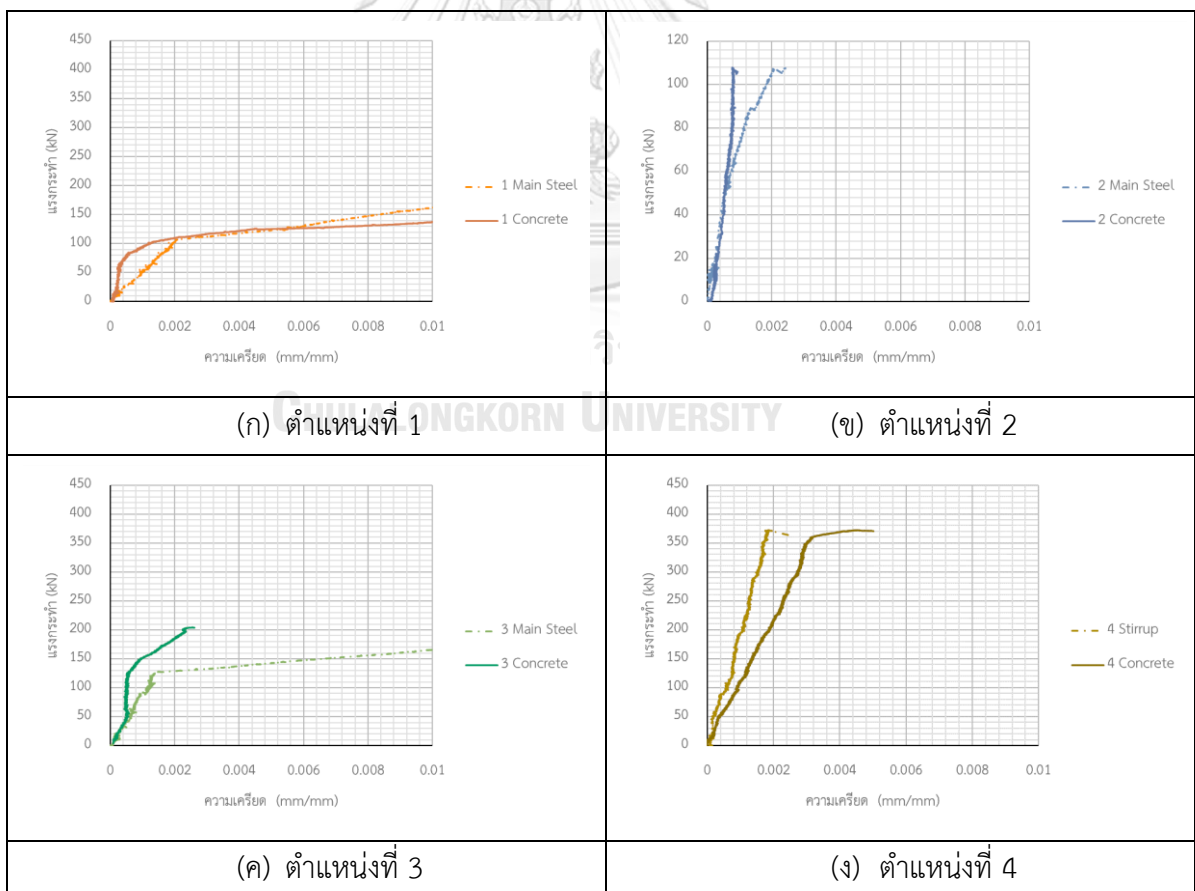


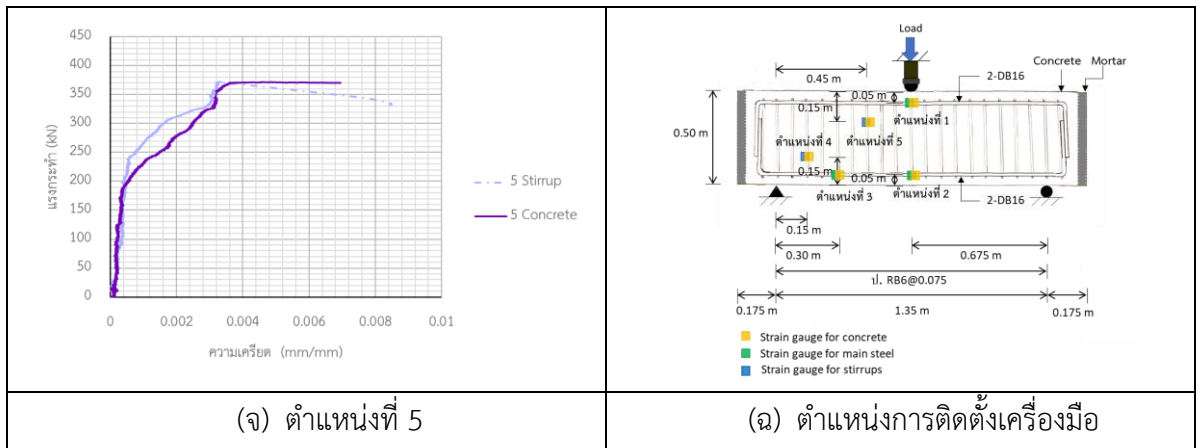
รูปที่ 69 ตัวอย่างการกระจายความเครียดที่ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH1.50 ที่แรงกระทำ 173.45 กิโลนิวตัน

คาน BH1.75 บริเวณที่ติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดที่ตำแหน่งเหล็กเสริมประกอบด้วย ตำแหน่งที่ 1 ถึง 3 และเหล็กปลอกตำแหน่งที่ 4 และ 5 แสดงดังรูปที่ 70(ฉ) เมื่อพิจารณาความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม ณ ตำแหน่งที่ 1 แสดงรูปที่ 70(ก) พบว่าความเครียดของกรอบแบบและคอนกรีตที่เดิมมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะโง่งที่ไม่สอดคล้องกัน และ

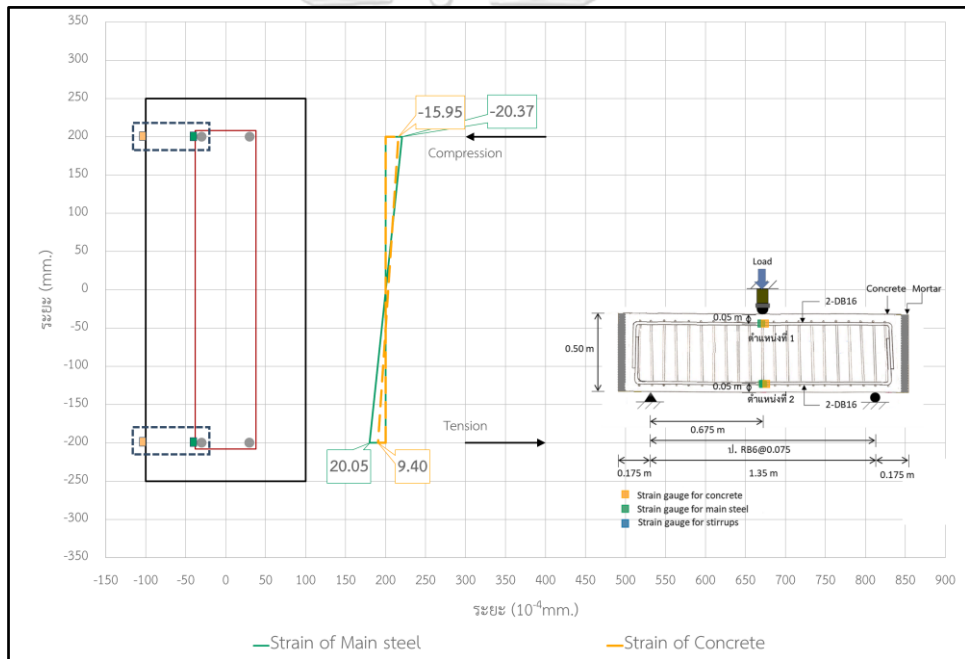
รูปที่ 70(ข) และ รูปที่ 70 (ค) ณ ตำแหน่งที่ 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่าความเครียดของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดของคอนกรีตที่ 0.003 เมื่อพิจารณาความเครียดของกรอบแบบ ณ ตำแหน่งที่ 4 และ 5 แสดงดังรูปที่ 70(ง) และ รูปที่ 70 (จ) พบว่ามีค่าน้อยกว่าความเครียดของคอนกรีตที่ใช้งานทั่วไปที่มีความเครียดของคอนกรีตอยู่ที่ 0.003

เมื่อพิจารณาแรงกระทำที่ค่าความเครียดของคอนกรีตเท่ากับ 0.00094 ตรงตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH1.75 มีค่าเท่ากับ 105.94 กิโลนิวตัน การกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 1 กับ 2 และ ตำแหน่งที่ 1 กับ 3 ของหน้าตัดคาน BH1.75 แสดงดังรูปที่ 71(ก) และ รูปที่ 71(ข) พบว่าความเครียดเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่รับแรงอัดมากกว่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่รับแรงดึง และรูปที่ 71(ค) พบว่าเหล็กปลอกที่ตำแหน่งที่ 4 เกิดการหลุดมากกว่ากรอบแบบ แต่ตำแหน่งที่ 5 กรอบแบบเกิดการยึดตัวน้อยกว่าเหล็กปลอก นอกจากนี้มีข้อสังเกตการกระจายความเครียดทั้ง 5 ตำแหน่งตามความยาวของคานแสดงดังรูปที่ 72 พบว่าเกิดการกระจายความเครียดตำแหน่งที่ 2 บ่งบอกถึงพฤติกรรมการวิบัติของแรงดัด

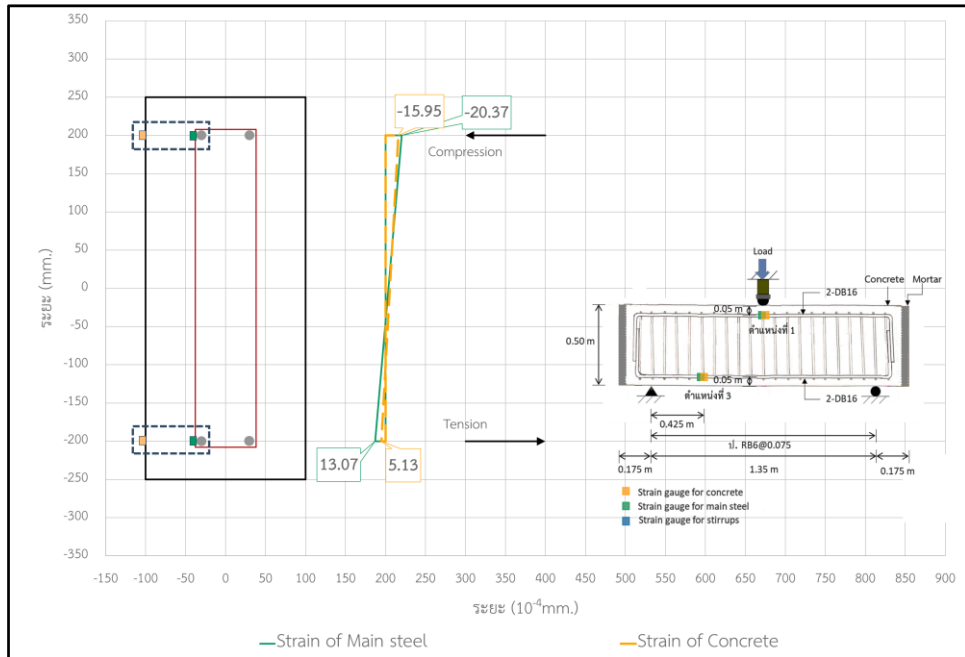




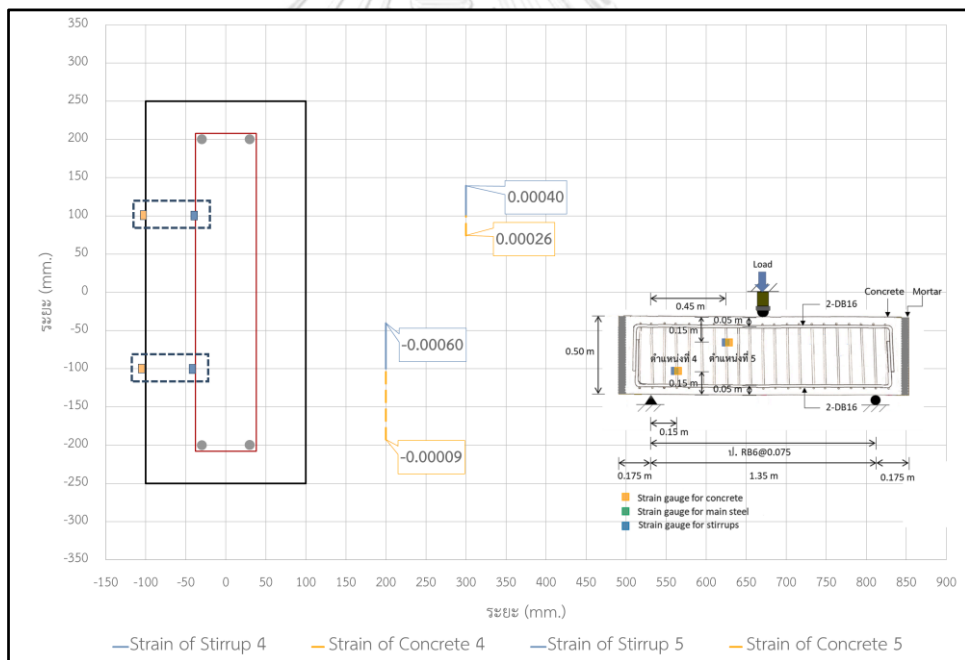
รูปที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน BH1.75





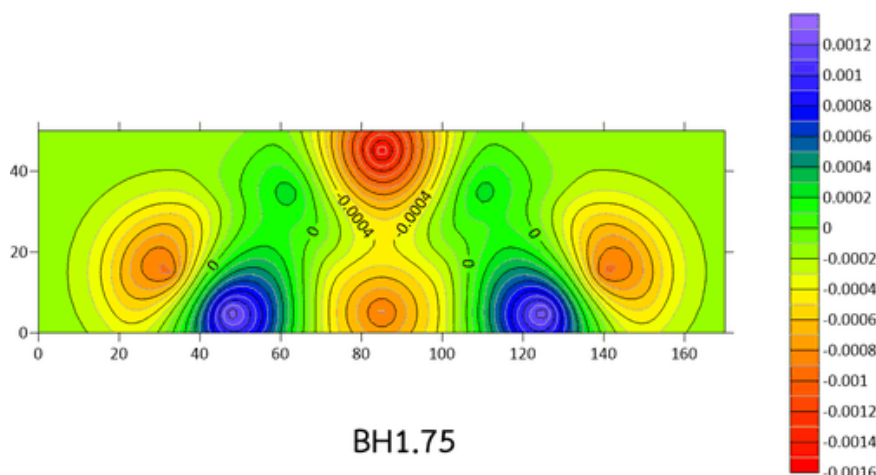


(ข) การกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 1 และ 3



(ค) การกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 4 และ 5

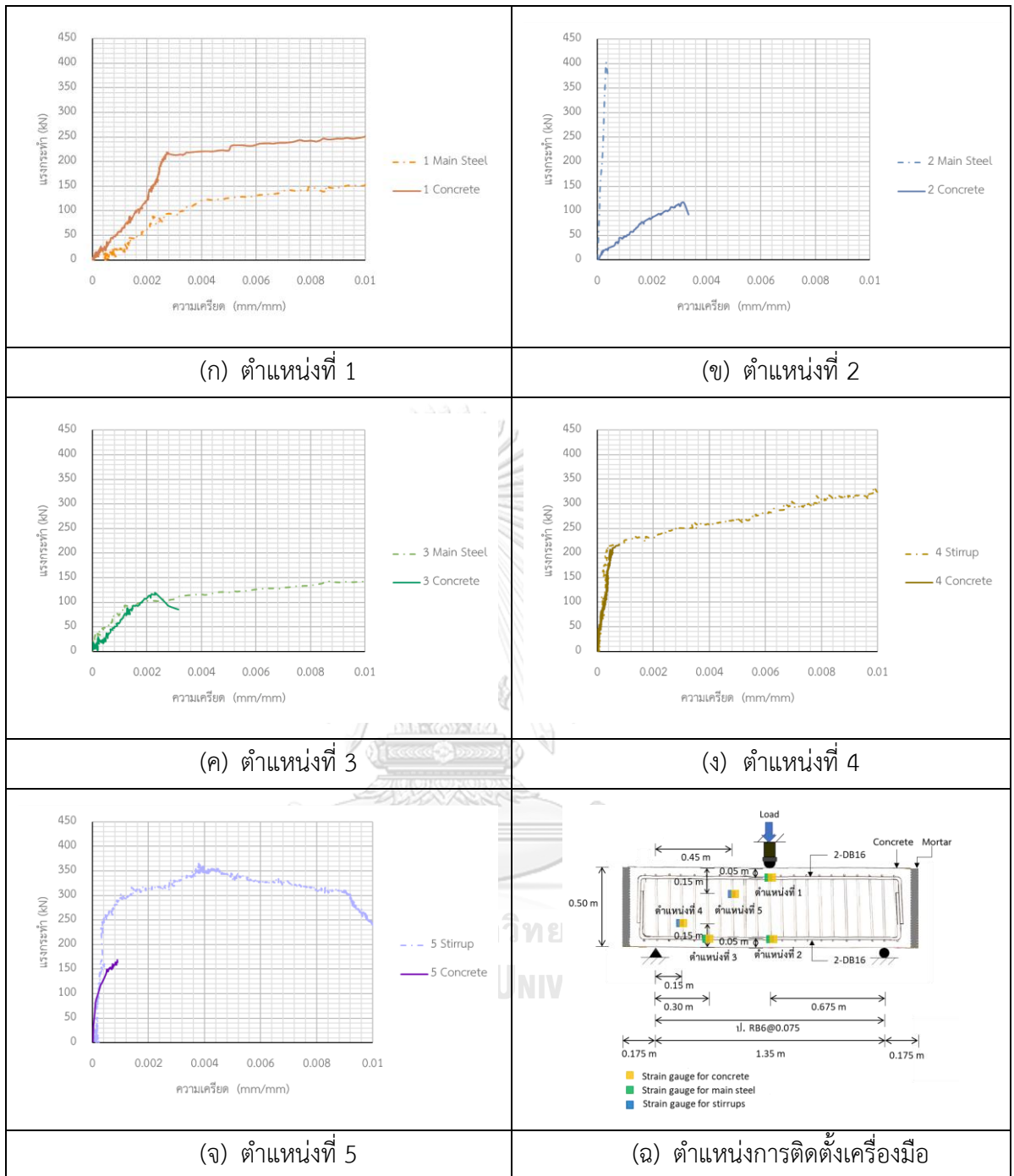
รูปที่ 71 การกระจายความเครียดของคาน BH1.75



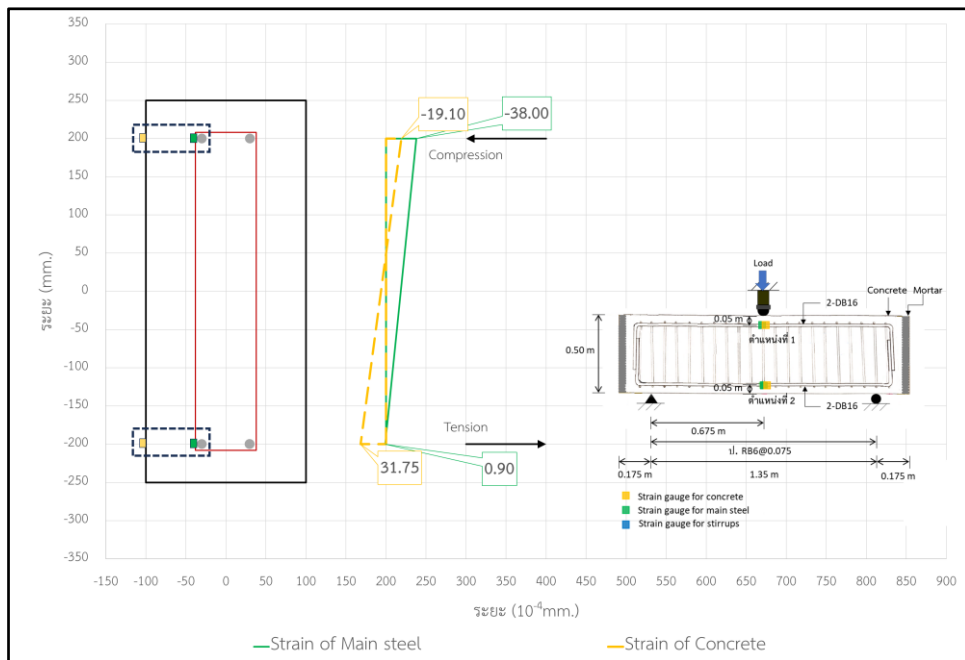
**รูปที่ 72** ตัวอย่างการกระจายความเครียดที่ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH1.75 ที่แรงกระทำ 105.94 กิโลนิวตัน

คาน BH2.00 เมื่อสังเกตตำแหน่งที่ 1 ถึง 3 เป็นตำแหน่งที่ติดตั้งบริเวณเหล็กเสริมพบว่ารูปที่ 73(ก) และรูปที่ 73(ข) มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของกรอบแบบและคอนกรีตที่เต็มไม่สอดคล้องกันตั้งแต่เริ่มต้น ซึ่งบ่งบอกได้ว่าวัสดุกรอบแบบและคอนกรีตที่เต็มแยกตัวกันอย่างเห็นได้ชัด และรูปที่ 73(ข) และ รูปที่ 73(ค) ณ ตำแหน่งที่ 2 และ 3 พบว่ากรอบแบบเกิดการวิบัติเมื่อแรงกระทำมีค่าเท่ากับ 116.71 กิโลนิวตัน นอกจากนี้ความเครียดของกรอบแบบที่ตำแหน่งที่ 4 และ 5 มีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดของคอนกรีตที่ 0.003 และเหล็กปลอกที่ตำแหน่งที่ 4 และ 5 เกิดการหลุดแสดงดังรูปที่ 73(ง) และรูปที่ 73(จ)

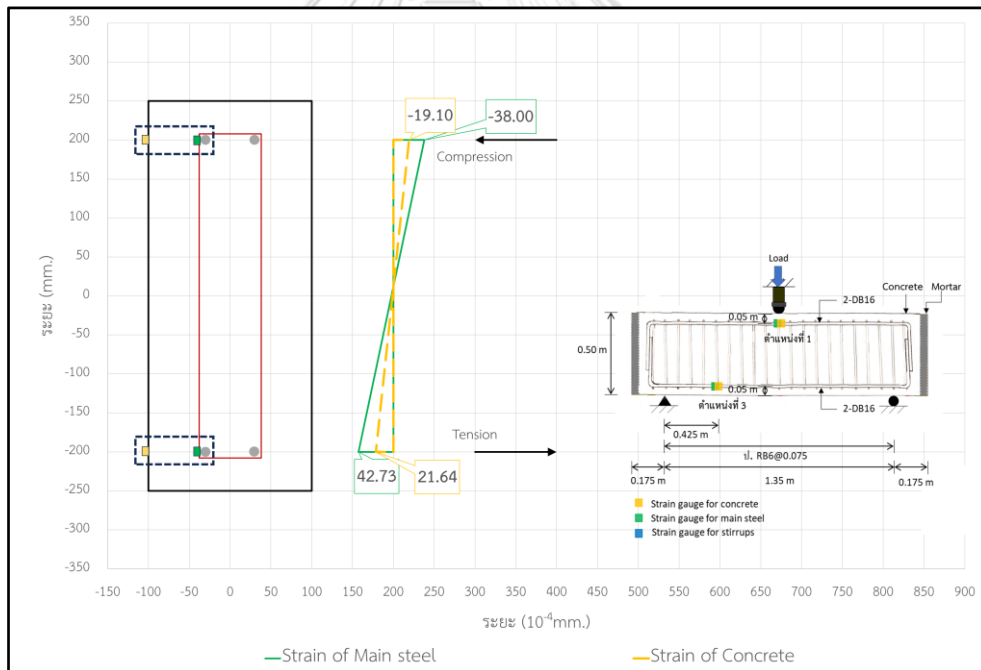
เมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH2.00 มีค่าความเครียดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 ที่แรงกระทำเท่ากับ 116.71 กิโลนิวตัน การกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 1 กับ 2 ของหน้าตัดคานพบว่าความเครียดของเหล็กกับกรอบแบบไม่สอดคล้องกันแสดงดังรูปที่ 74(ก) และการกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 1 และ 3 พบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่รับแรงดึงมีค่ามากกว่าความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่รับแรงอัดแสดงดังรูปที่ 74(ข) และเหล็กปลอก ณ ตำแหน่งที่ 4 และ 5 เกิดการหลุดที่ใกล้เคียงกัน แต่ตำแหน่งที่ 5 กรอบแบบเกิดการหลุดมากกว่าตำแหน่งที่ 4 แสดงดังรูปที่ 74(ค) นอกจากนี้การกระจายเครียดทั้ง 5 ตำแหน่งตามความยาวของคานแสดงดังรูปที่ 75 พบว่าการกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 1 เกิดการหลุด และความเครียดตำแหน่งที่ 4 และ 5 บริเวณเหล็กปลอกเกิดการหลุดของกรอบแบบพิมพ์และเหล็กปลอก ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการวิบัติของคานลึกที่เกิดการจากแรงเฉือน แต่ตำแหน่งที่ 2 และ 3 เกิดการขยายตัว



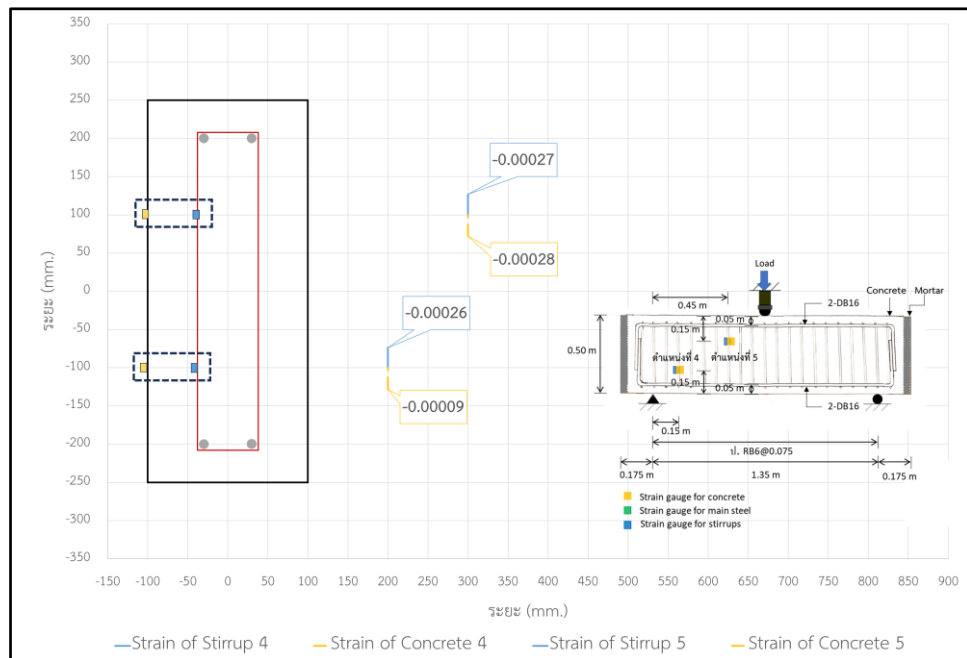
รูปที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน BH2.00



(ก) การกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 1 และ 2

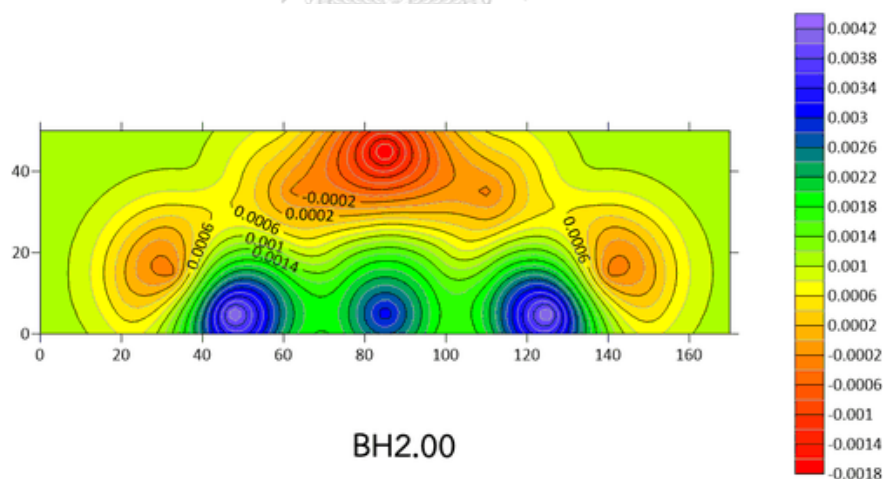


(ข) การกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 1 และ 3



(ค) การกระจายความเครียดที่ตำแหน่ง 4 และ 5

รูปที่ 74 การกระจายความเครียดของคาน BH2.00

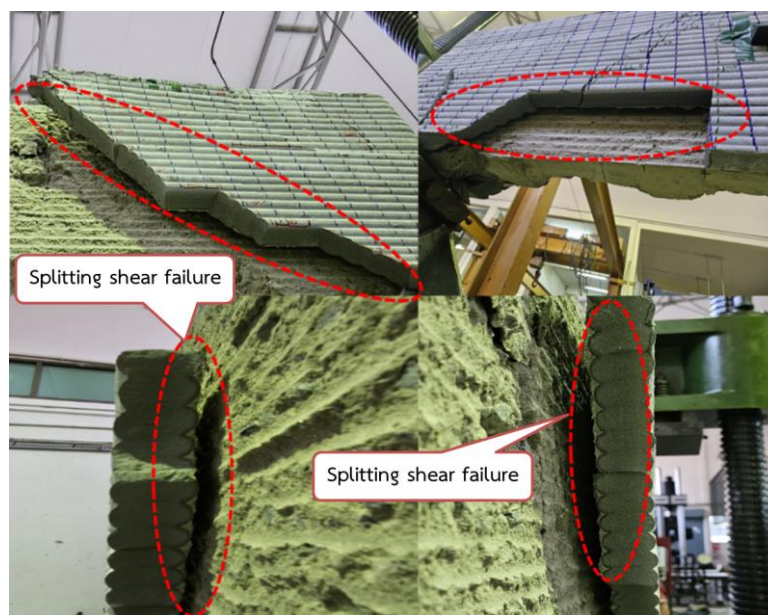


รูปที่ 75 ตัวอย่างการกระจายความเครียดที่ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH2.00 ที่แรงกระทำ 116.71 กิโลนิวตัน

จากข้อสมมติฐานเดิมว่าวัสดุกรอบแบบพิมพ์และคอนกรีตที่เติมเข้าไปจะถูกหล่อเป็นเนื้อเดียวกัน แต่กลับพบว่าค่าความเครียดขององค์ประกอบวัสดุทั้งสอง (คานที่ถูกหล่อเติมเข้าไป และกรอบแบบที่พิมพ์ด้วยวิธีพิมพ์ 3 มิติ) ไม่เป็นไปตามในทิศทางเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH1.50 และ BH2.00 ตำแหน่งที่ 1 ของคาน BH1.75 เป็นต้น ดังนั้นการออกแบบคาน

คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลังจึงไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ออกแบบ และเมื่อพิจารณาแรงกระทำที่แตกต่างกันเนื่องมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous) ระหว่างพื้นผิวคอนกรีตที่เดิม และพื้นผิวด้านในของชั้นคอนกรีตที่ใช้พิมพ์ส่งผลให้มีการถ่ายโอนความเครียดที่สูงขึ้นไปยังชั้นที่พิมพ์ จนกระทั่งเกิดการแตกหักแสดงดังรูปที่ 76 และด้วยสาเหตุนี้ทำให้มีบางส่วนที่สังเกตได้ในตัวอย่างต่างๆ ในช่วงสุดท้ายของการทดสอบคานที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติจะเกิดรอยร้าวและกรอบแบบได้แยกออกจากคอนกรีตที่เดิม เพราะฉะนั้นการวิบัติของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตที่ใช้พิมพ์ 3 มิติ และคอนกรีตที่เดิมสามารถอธิบายถึงการตอบสนองหลังจุดสูงสุดว่ามีความเสถียรน้อยกว่าคานอ้างอิง ซึ่งส่งผลต่อการรับแรงกระทำสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ ที่เกิดขึ้นแท้จริง และเมื่อวิเคราะห์แรงกระทำที่จุดคราก ณ ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 พบว่าความสูงของชั้นคอนกรีตที่พิมพ์ที่มีค่าน้อยส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวได้ดีกว่าชั้นความสูงของคอนกรีตที่พิมพ์ที่มีค่ามาก นอกจากนี้ตัวอย่างคานทั้งหมดมีค่าอัตราส่วนระหว่างช่วงการเชื่อมต่อความลึกประสิทธิผล ( $a/d$ ) ของคานทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 2 จึงบ่งบอกได้ว่าเป็นคานลึก (Deep Beam) จะมีพฤติกรรมที่ส่งผลต่อการกระจายความเครียดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (ปราชญ์ อมรภิญโญ และคณะ, 2560) ดังนั้นจำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพิมพ์และคอนกรีตที่เดิมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กพิมพ์ 3 มิติ และการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเสริมแรงด้วยเหล็กเสริมหรือวัสดุอื่นทดแทนที่สามารถช่วยรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่นการจัดเรียงเหล็กปลอกจึงมีผลต่อการรับแรงดัดของคานลึก (Sayyad & Patankar, 2013)

นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์การกระจายความเครียดของคาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 จะพบว่าการกระจายความเครียดในคาน BH1.75 มีลักษณะที่แตกต่างจากคาน BH1.50 และ BH2.00 โดยคาดการณ์ได้หลายสาเหตุ เช่น คอนกรีตภายในคานมีการกระจายตัวของส่วนผสมที่ไม่ดี การประสานของชั้นความสูงที่พิมพ์กรอบแบบอ่อนแอ เป็นต้น จึงส่งผลให้ลักษณะการกระจายความเครียดของคาน BH1.75 มีลักษณะเหมือนการวิบัติจากแรงดัด



รูปที่ 76 การวิบัติของแรงยึดเหนี่ยวในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติ

#### 4.4 ลักษณะการวิบัติ (Failure Mode)


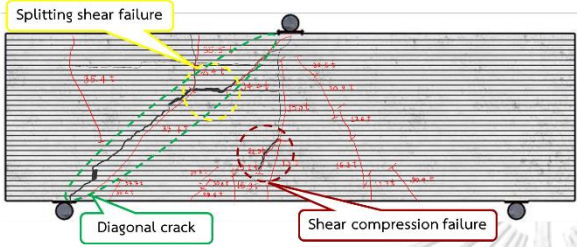

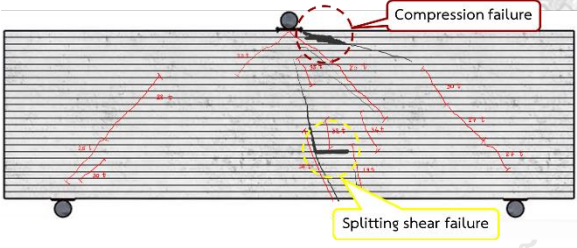

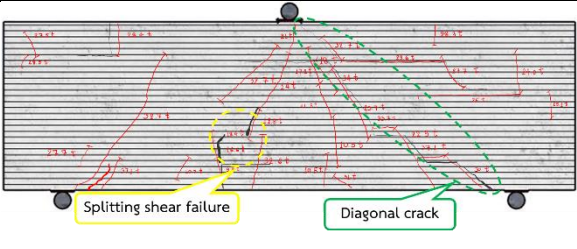

ตัวอย่างคานทั้งหมดที่ทำการทดสอบปรากฏว่ารูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยในช่วงเริ่มต้นจะพบรอยร้าวแรกที่บริเวณกึ่งกลางคานเพียงเล็กน้อยและรอยแตกร้าวจะถูกพัฒนาเมื่อเพิ่มแรงกระทำที่มากขึ้นและส่งผลทำให้เกิดรอยแตกร้าวนในแนวทแยง (Diagonal crack) ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนที่ถูกบีบอัด (Shear Compression) จนกระทั่งแรงกระทำที่มากที่สุดจะทำให้เกิดรอยแตกในแนวทแยงที่เชื่อมระหว่างจุดรับแรงและจุดรองรับซึ่งนำไปสู่การวิบัติในช่วงสุดท้ายของตัวอย่างคานที่ทดสอบทั้งหมด และเมื่อพิจารณาถึงคานที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติ ได้แก่ BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 จะสังเกตเห็นได้ว่ารอยร้าวที่เกิดในตัวอย่างคานมีลักษณะของรอยร้าวที่เคลื่อนผ่านระหว่างชั้นรอยต่อของคอนกรีตที่ใช้พิมพ์กรอบแบบซึ่งเกิดจากแรงเฉือน และการพังทลายในการยึดเกาะระหว่างกรอบแบบพิมพ์และคอนกรีตที่เต็ม โดยสังเกตเห็นได้ชัดเจนหลังจากเริ่มเกิดการแตกร้าวนในแนวทแยงด้วยข้อสังเกตนี้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นที่พิมพ์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับแบบพิมพ์ 3 มิติ จึงสันนิษฐานว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเหล่านี้กับคอนกรีตภายในที่ไม่เพียงพอ ทำให้บางส่วนได้เริ่มหลุดแยกออกจากกันก่อนที่จะเกิดการวิบัติที่แท้จริงแสดงดังรูปที่ 76 และลักษณะการวิบัติทั้งหมดของคาน NB และการวิบัติที่บริเวณกรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ ของคาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 แสดงดังรูปที่ 77 และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการวิบัติของภายในเนื้อคอนกรีตที่เต็มของคานที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์









3 มิติ แสดงดังรูปที่ 78 พบว่าคาน BH1.50 และคาน BH2.00 เกิดรอยร้าวกรอบแบบพิมพ์และภายในคอนกรีตที่เดิมที่เกิดจากแรงเฉือนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ตำแหน่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกัน คาน BH1.75 พบว่ากรอบแบบพิมพ์เกิดการวิบัติจากแรงเฉือน แต่ภายในคอนกรีตที่เดิมที่เกิดการวิบัติแรงดัด ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการกระจายความเครียดในรูปที่ 72 เมื่อสังเกตลักษณะของคอนกรีตที่เดิมภายในของคาน BH1.75 พบว่ามีลักษณะของหินที่กองอยู่บริเวณด้านล่าง และมีโพรงจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้คาน BH1.75 จึงเกิดการวิบัติที่ไม่เหมือนกับคาน BH1.50 และ BH2.00 ที่ควรจะเกิดในลักษณะการวิบัติจากแรงเฉือนตามพฤติกรรมของคานลึก

เมื่อพิจารณาการวิบัติของคาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 ที่เกิดขึ้น โดยสังเกตจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียด (Load-Strain Relationship) ในหัวข้อที่ 4.3 ที่แสดงในรูปที่ 67 70 และ 73 พบว่าคาน BH1.50 เกิดการวิบัติที่กรอบแบบก่อนที่ตำแหน่งที่ 3 จึงสามารถบ่งบอกได้ว่าเกิดจากแรงเฉือนในแนวเส้นทแยงที่เกิดเหมือนพฤติกรรมของคานลึก แต่การวิบัติที่เกิดขึ้นของคาน BH1.75 เกิดการวิบัติที่ตำแหน่งที่ 2 ที่กรอบแบบและเหล็กเสริมที่บริเวณกึ่งกลางคาน ซึ่งเกิดจากการผสมผสานระหว่างแรงดัดและแรงเฉือน โดยคาดว่าจะมีสาเหตุมาจากการเกิดแรงเฉือนขึ้นระหว่างชั้นที่พิมพ์ของกรอบ และคาน BH2.00 เกิดการวิบัติของกรอบแบบพิมพ์ที่ตำแหน่งที่ 2 และ 3 ก่อนเหล็กเสริมเพราะว่าวัสดุกรอบแบบพิมพ์มีความแข็งแรงมากกว่าคอนกรีตภายใน แต่เมื่อแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเกิดการวิบัติที่กลับพบว่าที่ตำแหน่งที่ 4 และ 5 พบว่าเหล็กปลอกรับแรงเฉือนเกิดการวิบัติที่แรงกระทำ 364.77 กิโลนิวตัน แต่จะพบว่าคาน BH2.00 ยังสามารถรับแรงกระทำต่อไปได้จนกระทั่งไม่สามารถรับแรงได้อีกที่ 405.74 กิโลนิวตัน เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการวิบัติดังกล่าวคาน NB BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 จะมีพฤติกรรมเป็นไปตามการวิบัติของคานลึก แต่คาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 จะมีการพังทลายของกรอบแบบหลุดออกมาแบบแยกส่วนที่เกิดจากแรงเฉือน (Splitting Shear) ระหว่างกรอบแบบกับคอนกรีตที่เดิม ดังนั้นควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุทั้งสองเพื่อให้เกิดความแม่นยำของแรงกระทำที่เกิดกับโครงสร้างของคาน หรือการเพิ่มเติมโดยใช้สารเคมีที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุทั้งสองเพื่อให้ได้ความสามารถของแรงกระทำของวัสดุ และศึกษาจำนวนตัวอย่างที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำของข้อมูล



	
<div style="background-color: #4a7ebb; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">NB</div>	
	
(ก) ก่อนกรอบแบบพังทลาย	(ข) หลังกรอบแบบพังทลาย
<div style="background-color: #f4b400; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">BH1.50</div>	
	
(ก) ก่อนกรอบแบบพังทลาย	(ข) หลังกรอบแบบพังทลาย
<div style="background-color: #e67e22; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">BH1.75</div>	
	
(ก) ก่อนกรอบแบบพังทลาย	(ข) หลังกรอบแบบพังทลาย
<div style="background-color: #2e8b57; color: white; padding: 5px; display: inline-block;">BH2.00</div>	

รูปที่ 77 ลักษณะการวิบัติของคาน

	
(ก) กรอบแบบพังทลาย	(ข) ภายในคอนกรีตที่เต็ม
<b>BH1.50</b>	
	
(ก) กรอบแบบพังทลาย	(ข) ภายในคอนกรีตที่เต็ม
<b>BH1.75</b>	
	
(ก) กรอบแบบพังทลาย	(ข) ภายในคอนกรีตที่เต็ม
<b>BH2.00</b>	

รูปที่ 78 ลักษณะการวิบัติของคานที่พิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติที่บริเวณกรอบแบบและภายในคอนกรีตที่เต็ม

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุปของการศึกษา

การศึกษานี้ได้ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมการของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ตัวอย่างคานที่ทดสอบจะประกอบด้วยคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ จำนวน 3 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นที่แตกต่างกัน (BH1.50 BH1.75 และ BH2.00) และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อ้างอิง จำนวน 1 ชั้น (NB) โดยทดสอบภายใต้การดัดงอที่จุดกึ่งกลาง

จากผลการทดสอบบ่งชี้ว่าข้อดีคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ สามารถลดความซับซ้อนของกระบวนการเสริมแรงและลดการใช้แรงงาน อย่างไรก็ตามจากความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับความเครียดบ่งบอกว่าวัสดุพิมพ์และคอนกรีตที่เดิมมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน และมีข้อสังเกตเรื่องของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพิมพ์และคอนกรีตที่เดิมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ อีกทั้งตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อ้างอิงสามารถรับแรงกระทำที่สูงกว่าคานที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติ และเมื่อพิจารณาถึงการพังทลายของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพิมพ์และคอนกรีตที่เดิมนั้นเป็นปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำของคานที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติ ลดลง ดังนั้น การศึกษานี้สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

(1) เมื่อพิจารณาเฉพาะความกว้างของเนื้อคานที่แท้จริง (b) ที่ไม่รวมกับกรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ เพราะฉะนั้นค่า b ของคาน NB BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 จะมีค่าเท่ากับ 200.00 133.00 114.00 และ 110.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเปรียบเทียบค่าร้อยละความแตกต่างของ  $P_{max}$  ระหว่างผลจากการทดสอบกับการออกแบบตามสมการของ Nagarajan and Pillai (2008) พบว่าคาน NB BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 มีค่าร้อยละ 44.04 55.69 61.92 และ 65.49 ตามลำดับ

(2) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อ้างอิงสามารถรับแรงกระทำที่ได้มากกว่าคานที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติ เพียงเล็กน้อย หรือแรงกระทำของคานที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติเมื่อเทียบกับคานที่อ้างอิงพบว่าแรงกระทำลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 10.24 ถึง 16.15

(3) คาน NB มีค่าการโก่งตัวที่มากกว่าคาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 คิดเป็นร้อยละ 27.08 40.51 และ 52.31 ตามลำดับ

(4) เมื่อพิจารณาถึงความชัน (Slope) ของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งของคานทั้งหมดพบว่าความสูงของชั้นที่พิมพ์ส่งผลต่อความชันหรือความสูงของชั้นที่พิมพ์แปรผันตรงกับค่า

ความชัน ซึ่งบ่งบอกถึงความต้านทานต่อแรงกระทำหรือการรับกำลังอัดที่มากขึ้น แต่ความยืดหยุ่นของวัสดุและความเหนียวน้อย โดยสังเกตได้ว่าความชันของ BH1.50 มีค่าที่น้อยกว่าคาน BH1.75 และ BH2.00 เพียงเล็กน้อย

(5) กรอบแบบและเนื้อคานคอนกรีตไม่เป็นวัสดุเดียวกัน (Inhomogeneous) จึงทำให้ไม่สามารถใช้มาตรฐานการออกแบบเดียวกับคานอ้างอิงได้

(6) ความสูงของชั้นคอนกรีตที่พิมพ์กรอบแบบที่มีค่าน้อยจะทำให้เกิดผิวสัมผัสของกรอบแบบพิมพ์กับเนื้อคอนกรีตที่เดิมที่มากกว่าความสูงของชั้นที่มากจึงส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพิมพ์กรอบและคอนกรีตที่เดิมได้ดี

(7) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุกรอบแบบพิมพ์และคอนกรีตเสริมเหล็กส่งผลต่อประสิทธิภาพการรับแรงกระทำของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ

(8) ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคานทั้งหมดมีการก่อตัวของรอยร้าวในแนวทแยง ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนและมีลักษณะพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นไปตามพฤติกรรมของคานลึกลับบริเวณกรอบแบบพิมพ์ แต่รอยร้าวบริเวณภายในคอนกรีตที่เดิมไม่เกิดการวิบัติที่ตำแหน่งเดียวกัน และพบว่าเกิดการเฉือนระหว่างวัสดุกรอบแบบและคอนกรีตเสริมเหล็ก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษางานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับพฤติกรรมรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ได้แก่

(1) การศึกษาแรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างกรอบแบบคานที่พิมพ์ 3 มิติ และเนื้อคอนกรีตของคาน เพื่อนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้แบบพิมพ์ 3 มิติ

(2) การศึกษาคานตัวอย่างโดยใช้สารเคมีที่เชื่อมประสานกรอบแบบพิมพ์ 3 มิติกับคอนกรีตที่เดิมเพื่อปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด

(3) การศึกษาการพิมพ์กรอบแบบคานในรูปทรงการพิมพ์กรอบแบบคานที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ลักษณะแนวเส้นชั้นที่พิมพ์มีลักษณะขนานกับเหล็กปลอก

(4) การศึกษาและตรวจสอบอิทธิพลของเวลาต่างๆ ที่เดิมคอนกรีตในกรอบแบบ พารามิเตอร์การพิมพ์ที่แตกต่างกัน และการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีต่อพฤติกรรมทางกลและความทนทานของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ

(5) การเพิ่มจำนวนการทดสอบที่มากขึ้นเพื่อหาสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ของแรงกระทำในคานจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ

(6) การศึกษากรณีคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ ที่สามารถรับแรงเฉือนได้มากกว่าแรงดัดที่เกิดขึ้น หรือเกิดการวิบัติแบบแรงดัด (Flexural failure) หรืออัตราส่วนระหว่างช่วงการเฉือนต่อความลึก ( $a/h$ ) มากกว่า 2

(7) การลดกำลังรับแรงอัดของวัสดุพิมพ์กรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ หรือการเสริมวัสดุเส้นใยเพื่อช่วยเรื่องการแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นความสูงที่พิมพ์และคอนกรีตที่เติมเพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติแบบแยกส่วนที่เกิดจากแรงเฉือน หรือ แรงเฉือนจริง (Splitting shear failure)





## บรรณานุกรม

- ACI 318-19, A. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary.
- Al-Chaar, G. K., & Kozych, A. (2020). Flexural Behavior of 3D Printed Concrete Beam with Fiber Reinforcement. *Journal of Construction Research*, 2(2).
- ASTM C109/C109M, A. S. o. T. M. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens).
- ASTM C348, A. I. (2021). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. In: ASTM International West Conshohocken, PA.
- ASTM C496/C496M, A. I. (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In: ASTM International West Conshohocken, PA.
- ASTM C807, A. I. (2021). Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle. In: ASTM International West Conshohocken, PA.
- Demyanenko, O., Sorokina, E., Kopanitsa, N., & Sarkisov, Y. (2018). Mortars for 3D printing. MATEC Web of Conferences, DUBLIN. (2021). *Global 3D Concrete Printing Industry (2020 to 2027) - Market Trajectory & Analytics - ResearchAndMarkets.com*. BUSINESS WIRE.  
<https://www.businesswire.com/news/home/20210715005784/en/Global-3D-Concrete-Printing-Industry-2020-to-2027---Market-Trajectory-Analytics---ResearchAndMarkets.com>
- FORMLABS. (2017). *The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing*.  
[https://static.treatstock.com/static/fxd/wikiMaterials/resin/files/resin\\_3d\\_printing\\_guide.pdf](https://static.treatstock.com/static/fxd/wikiMaterials/resin/files/resin_3d_printing_guide.pdf)
- FORMLABS. (2021). *Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing*.  
<https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- Furet, B., Poullain, P., & Garnier, S. (2019). 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete. *Additive Manufacturing*, 28, 58-64.
- Garcia, E. (2023). *3D printing reaches new heights with two-story home*. REUTERS.

[https://www.reuters.com/technology/3d-printing-reaches-new-heights-with-two-story-home-2023-01-12/?fbclid=IwAR22A2Ld\\_gsE7P6ebxLIEPvFORrnLSJCZE\\_YJOJpGrxNvpwbbx6RWOSD2s](https://www.reuters.com/technology/3d-printing-reaches-new-heights-with-two-story-home-2023-01-12/?fbclid=IwAR22A2Ld_gsE7P6ebxLIEPvFORrnLSJCZE_YJOJpGrxNvpwbbx6RWOSD2s)

Gebhard, L., Mata-Falcón, J., Anton, A., Dillenburger, B., & Kaufmann, W. (2021).

Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies. *Engineering Structures*, 240, 112380.

Hiemenz, J. (2011). 3D printing with FDM: How it Works. *Stratasys Inc*, 1, 1-5.

Jiramarootapong, P., Prasittisopin, L., Snguanyat, C., Tanapornraweekit, G., & Tangtermsirikul, S. (2020). Load carrying capacity and failure mode of 3D printing mortar wall panel under axial compression loading. RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication,

JSCE-SF4, J. S. o. C. E. (1984). Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. *Concrete library of JSCE, Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete(3)*, 58-61.

Katzer, J., & Szatkiewicz, T. (2020). Effect of 3d printed spatial reinforcement on flexural characteristics of conventional mortar. *Materials*, 13(14), 3133.

Nagarajan, P., & Pillai, T. M. (2008). Analysis and design of simply supported deep beams using strut and tie method. *Advances in Structural Engineering*, 11(5), 491-499.

Nguyen-Van, V., Choudhry, N. K., Panda, B., Nguyen-Xuan, H., & Tran, P. (2022).

Performance of concrete beam reinforced with 3D printed Bioinspired primitive scaffold subjected to three-point bending. *Automation in Construction*, 134, 104060.

Olivera, S., Muralidhara, H. B., Venkatesh, K., & Gopalakrishna, K. (2016). *EVALUATION OF SURFACE INTEGRITY AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF ELECTROPLATED ABS PLASTICS DEVELOPED USING FDM PROCESS.*

Park, J.-H., Lee, J., Joh, C., & Yang, I.-H. (2019). Buildability of 3D Printed Concrete Structures at Various Nozzle Speeds and Aspect Ratios. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 7(4), 375-382.

Pham, L., Lu, G., & Tran, P. (2022). Influences of printing pattern on mechanical

- performance of three-dimensional-printed fiber-reinforced concrete. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(1), 46-63.
- Prasittisopin, L., Jiramarootapong, P., Pongpaisanseree, K., & Snguanyat, C. (2019). Lean manufacturing and thermal enhancement of single-layer wall with an additive manufacturing (AM) structure. *ZKG Intern*, 4, 64-74.
- Prasittisopin, L., & Sereewatthanawut, I. (2019). Dissolution, nucleation, and crystal growth mechanism of calcium aluminate cement. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(3), 180-197.
- Prasittisopin, L., & Trejo, D. (2013). Effects of mixing and transportation on characteristics of cementitious systems containing fly ash. World of Coal Ash Conf,
- Sayyad, A. S., & Patankar, S. V. (2013). Effect of stirrups orientation on flexural response of RC deep beams. *American journal of civil engineering and Architecture*, 1(5), 107-111.
- Tay, Y. W. D., Lim, J. H., Li, M., & Tan, M. J. (2022). Creating functionally graded concrete materials with varying 3D printing parameters. *Virtual and Physical Prototyping*, 17(3), 662-681.
- Teixeira, J., Schaefer, C., Rangel, B., Alves, J. L., Maia, L., Nunes, S., Neto, R., & Lopes, M. (2021). Development of 3D printing sustainable mortars based on a bibliometric analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 235(6), 1419-1429.
- Waheed, S., Cabot, J. M., Macdonald, N. P., Lewis, T., Guijt, R. M., Paull, B., & Breadmore, M. C. (2016). 3D printed microfluidic devices: enablers and barriers. *Lab on a Chip*, 16(11), 1993-2013.
- Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., & Roussel, N. (2016). Digital concrete: opportunities and challenges. *RILEM Technical Letters*, 1, 67-75.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2562). แบบบ้านसानฝัน ของขวัญปีใหม่ คนไทยมีความสุข บ้าน อารยสถาปัตย์ 3 กระทรวงมหาดไทย. <https://office.dpt.go.th/construction/th/dream-house/10151>
- ธัญญะสุขวณิชย์, ช., ดวงวิไลลักษณ์, ท., & ปานสุข, ว. (2021). การศึกษาอัตราส่วนผสมและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา



แห่งชาติครั้งที่ 26, 26.

- นรเศรษฐ์, ธ., หรยางกูร, ว., & อาจารย์ที่ปรึกษา. (2015). แนวทางการออกแบบและก่อสร้าง  
สถาปัตยกรรมรูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้นโค้งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์:  
กรณีศึกษาการออกแบบศาลาอเนกประสงค์.
- มอก.20. (2559). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กเส้นกลม. In:  
กระทรวงอุตสาหกรรม.
- มอก.24. (2559). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย. In:  
กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ลิมสุวรรณ, ด. เ. (2565). โครงสร้าง ระบบ แรงอัด-แรงดึง.
- วสท.011008-21. (2564). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. In: วิศวกรรมสถาน  
แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- อมรภิญโญ, ป., & ธีระวงษ์, จ. (2017). พฤติกรรมของคานาลูกคอนกรีตเสริมเหล็ก: การทดสอบและการ  
วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์. *Kasetsart Engineering Journal*, 30(102), 73-82.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฏฐา เวสสะภักดี
วัน เดือน ปี เกิด	4 สิงหาคม 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา- ชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2560 แล้วเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคปลายของปีการศึกษา 2563
ที่อยู่ปัจจุบัน	254/248 แขวงค้อก ฮอไรซอน พี 48 ถนนเพชรเกษม แขวงบางหว้า เขต ภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร 10160