

คำแนะนำในการจัดทำบทความสำหรับ  
วิชา โครงงานทางวิศวกรรมโยธา  
Guidelines to Make a Manuscript for Submission to  
the Civil Engineering Project

ณพนันต์ อมรรพรวิวัฒน์<sup>1</sup> ภูติส ภูลภัทร์แสงทอง<sup>2</sup> และ รศ.ดร.วิฑิต ปานสุข<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเพื่อศึกษาอายุของแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติส่งผลต่อการเชื่อมประสานระหว่างแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ กับ คอนกรีตหล่อในที่หรือไม่ และเพื่อตรวจสอบการรับแรงเฉือนบริเวณรอยต่อระหว่างแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ กับ คอนกรีตหล่อในที่ว่ามีคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวเพียงพอที่จะทำให้คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เต็มประสิทธิภาพ

จากการทดสอบคาน พบว่าแรงที่รับได้ของคานตัวอย่างที่สร้างโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติและแบบหล่อถาวรมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยมาตรฐาน ACI และเมื่อคำนวณค่าแรงเฉือนต่อหนึ่งหน่วยความยาว (Shear Flow) ของคานจะได้ค่าที่มากกว่าค่าแรงเฉือนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Shear Stress) ของตัวอย่างทดลองทุก ๆ อายุของแบบหล่อจากการพิมพ์สามมิติ จากการทดสอบกดอัดแบบทดสอบที่มีอายุของแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ ที่ต่างกันพบว่า ตัวอย่างทดสอบที่มีอายุต่างกันมีผลต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ กับคอนกรีตหล่อในที่ โดยแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ ที่มีแรงยึดเหนี่ยวมากที่สุด คือ 7 วัน, 14 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ ดังนั้นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอายุของแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติจึงแสดงให้เห็นว่าอายุมีผลต่อคุณสมบัติการยึดเหนี่ยว

คำสำคัญ: การพิมพ์สามมิติ, แบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ, การยึดเหนี่ยว, แบบหล่อถาวร

## Abstract

The objective of this research is to study whether the age of 3D printed permanent formwork affects the bonding between the 3D printed permanent formwork and cast-in-place

concrete. Additionally, it aims to examine the shear strength at the interface between the 3D printed permanent formwork and the cast-in-place concrete to determine if the bonding properties are sufficient for beams to fully support their load capacity.

Based on beam testing, it was found that the load capacity of the sample beams constructed using 3D printing technology and permanent formwork exceeds the values calculated according to ACI standards. Furthermore, when calculating the shear flow of the beams, the obtained values are higher than the shear stress values of the test samples at every age of the 3D printed formwork. From compression testing on samples with varying ages of 3D printed permanent formwork, it was found that the different ages of the samples affect the adhesion between the 3D printed permanent formwork and the cast-in-place concrete. The 3D printed permanent formwork with the highest adhesion was observed at 7 days, 14 days, and 3 days, respectively. Therefore, the factor related to the age of the 3D printed permanent formwork indicates that age impacts adhesion. Keywords: 3D printing, 3D printed permanent formwork, bonding, permanent

## 1. บทนำ

### 1.1 ที่มา และความสำคัญ

ในปัจจุบันมีนวัตกรรมและเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างอย่างหลากหลาย โดยหนึ่งในนวัตกรรมที่ได้รับความนิยมคือ คอนกรีตหล่อ

สำเร็จ ซึ่งช่วยประหยัดเวลาและง่ายต่อการก่อสร้าง แต่มีข้อเสียคือต้นทุนของแม่แบบที่สูง จึงทำให้การสร้างบ้านมีรูปแบบใกล้เคียงเดิมเพื่อประหยัดค่าแม่แบบ

เพื่อแก้ปัญหาี้ มีการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมาใช้ในการสร้างแบบหล่อถาวร ซึ่งช่วยให้สามารถหล่อคอนกรีตตามรูปทรงที่ต้องการได้ตามต้องการ แต่เทคโนโลยีนี้ยังมีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น สามารถสร้างได้แค่บ้านชั้นเดียว ดังรูปที่ 1 ถ้าจะขึ้นชั้นต่อไปต้องใช้ระบบเสาคาน



รูปที่ 1 Co-Working Space by SCG อาคารที่สร้างด้วยการพิมพ์สามมิติ

แม้ว่าแบบหล่อถาวรจะมีข้อดี แต่ยังมีข้อเสียเช่น ใช้เวลาในการติดตั้งนาน ใช้แรงงานมาก และสิ้นเปลืองทรัพยากร ซึ่งบางครั้งใช้เพียงครั้งเดียวแล้วทิ้ง ทำให้สิ้นเปลืองเงินทุนและก่อให้เกิดขยะ

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติและแบบหล่อถาวรร่วมกันมีเป้าหมายเพื่อแก้ปัญหาของแต่ละเทคโนโลยี เช่น การสร้างชั้นสองไม่ได้ของการพิมพ์สามมิติ และการสิ้นเปลืองแบบหล่อของแบบหล่อถาวร แต่ยังมีปัญหาในการยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นงานพิมพ์กับคอนกรีต ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงและความคงทนของโครงสร้าง

ปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาคืออายุของแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาวิธีการแก้ไขและพัฒนาเทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินในวงการก่อสร้าง

การพัฒนาและปรับปรุงเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติและแบบหล่อถาวรเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้เทคโนโลยีนี้เป็นที่ยอมรับในวงกว้างและสามารถแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอายุของแบบหล่อคอนกรีตถาวรจากการพิมพ์สามมิติ ส่งผลต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างแบบหล่อคอนกรีตจาก การพิมพ์สามมิติ กับคอนกรีตหล่อในที่หรือไม่

2. เพื่อตรวจสอบการรับแรงเฉือนบริเวณรอยต่อระหว่างแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ กับ คอนกรีตหล่อในที่ว่ามีคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวเพียงพอที่จะทำให้คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เต็มประสิทธิภาพ

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. แบบหล่อคอนกรีตถาวรที่ถูกพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติแบบ FDM

2. ตัวอย่างทดสอบถูกออกแบบมาเพื่อรับแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากแรงเฉือนเท่านั้น

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบปัจจัยด้านเวลาว่ามีผลต่อการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตหล่อในที่และแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ

2. ทราบเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เต็มประสิทธิภาพหรือไม่

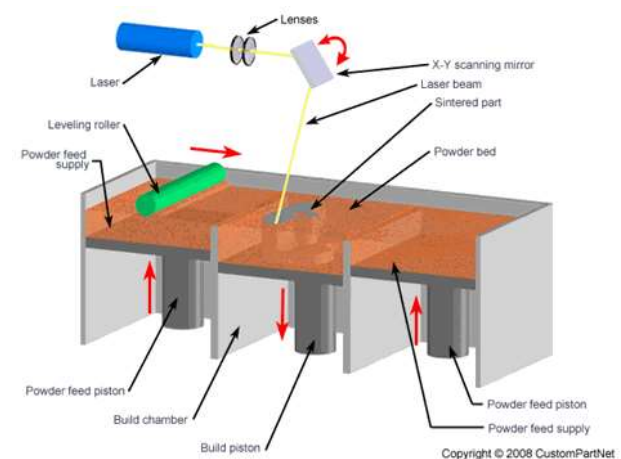
## 2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 รูปแบบการพิมพ์เทคโนโลยีสามมิติ

โดยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้ต่อไปนี้ (ณัฐภา เวสสะภักดี. 2022 : 5)

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

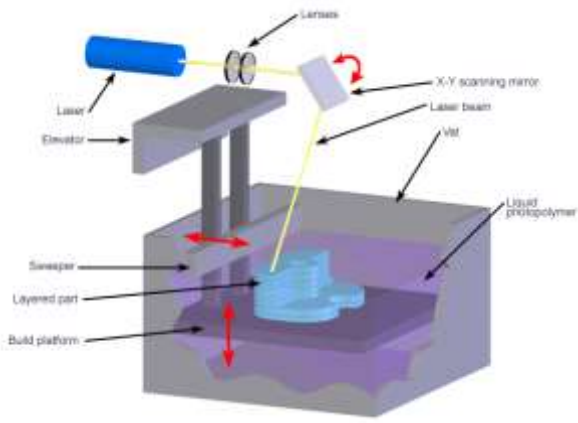
เทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาและดัดแปลงให้สามารถใช้งานได้กับวัสดุที่หลากหลาย เช่น พลาสติก โลหะ แก้ว และวัสดุผสมอื่น ๆ SLS ใช้ลำแสงเลเซอร์ในการหลอมละลายวัสดุให้เป็นของแข็งตามรูปแบบที่ต้องการจากไฟล์ออกแบบสามมิติ โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน เครื่องพิมพ์ชนิดนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมผลิตสินค้าที่หลากหลาย ได้แก่ เสื้อผ้า อะไหล่ และอุปกรณ์ของเครื่องจักร องค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ SLS แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 องค์ประกอบของเครื่องพิมพ์สามมิติ แบบ SLS

#### 2. Stereolithography (SLA)

Stereolithography (SLA) เป็นเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติที่ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เครื่องพิมพ์ SLA ใช้เทคโนโลยีที่ยิงลำแสง UV ไปยังตำแหน่งที่ต้องการพิมพ์อย่างต่อเนื่อง ทำให้ผงหรือเม็ดพลาสติกหลอมละลายและประสานตัวกันเป็นชั้นๆ จนได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ ซึ่งมีความละเอียดและแม่นยำสูง เครื่องพิมพ์ชนิดนี้ถูกนำไปใช้ในการผลิตสินค้าพลาสติกที่ต้องการคุณภาพสูง เช่น เครื่องประดับและอุปกรณ์ด้านทันตกรรม แสดงดังรูปที่ 3

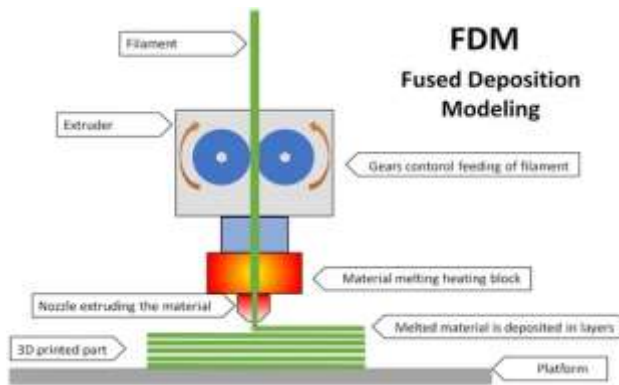


รูปที่ 3 เครื่องพิมพ์สามมิติ แบบ Stereolithography (SLA)

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

FDM ทำงานโดยการอัดฉีดวัสดุผ่านหัวฉีดให้ซ้อนทับกันทีละชั้นจนเสร็จสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 4 เทคนิคนี้ทำให้ชิ้นงานมีความละเอียดน้อยกว่าเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติแบบอื่นๆ แต่มีต้นทุนการผลิตต่ำ ตัวอย่างกระบวนการทำงานของเครื่องพิมพ์ FDM เทคโนโลยีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น การผลิตเครื่องประดับตกแต่ง อุตสาหกรรมการก่อสร้าง และอื่นๆ

ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เทคโนโลยี FDM เป็นที่นิยมเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้รายละเอียดของชิ้นงานมาก และช่วยประหยัดเวลาในการก่อสร้างและลดการใช้ไม้แบบ ดังนั้น การศึกษานี้จึงเลือกใช้เทคโนโลยี FDM ในการสร้างชิ้นตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 กระบวนการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติ แบบ FDM

### 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติในด้านการก่อสร้าง

(ณัฐภา เวสสะภักดี. 2022 : 8)

#### 1. ปัจจัยของคุณสมบัติของเครื่องพิมพ์สามมิติ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อเทคนิคการพิมพ์คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวฉีด เนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแข็งตัวของคอนกรีต

#### 2. คุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้สำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ

การใช้วัสดุประสานเป็นเส้นใยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของคอนกรีตในการใช้งานร่วมกับเครื่องพิมพ์สามมิติ เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ

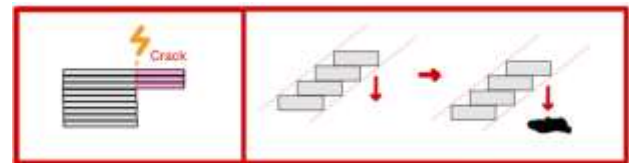
คอนกรีตเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดและแรงดัดผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตมีสัดส่วนความแข็งแรงเมื่อเทียบกับน้ำหนักประมาณร้อยละ 50

#### 3. ลักษณะรูปทรง หรือรูปแบบการพิมพ์

การพิมพ์คอนกรีตในทิศทางเดียวกันมักพบปัญหาเรื่องแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นที่เชื่อมกัน ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงอัดและแรงดัดของคอนกรีต Pham et al. (2022) ได้ศึกษาผลกระทบของการจัดเรียงชั้นคอนกรีตซ้อนทับกัน โดยปรับมุมมองของการพิมพ์แต่ละชั้น เริ่มต้นที่ 0 องศาในแนวราบและเพิ่มมุมทีละ 10 องศา จนถึง 90 องศา นอกจากนี้ยังปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตด้วยการเพิ่มเส้นใย 0.75% ของปริมาตรพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงอัดและแรงดัดได้ดี

#### 4. ข้อจำกัดในการพิมพ์สามมิติ

การพิมพ์สามมิติที่มีลักษณะเป็นคานยื่นไม่สามารถขึ้นรูปได้เพราะไม่มีฐานมารองรับแสดง และการพิมพ์ลักษณะขั้นบันไดที่มีความชันที่มากจะส่งผลต่อการพังทลาย เนื่องจากน้ำหนักของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 5



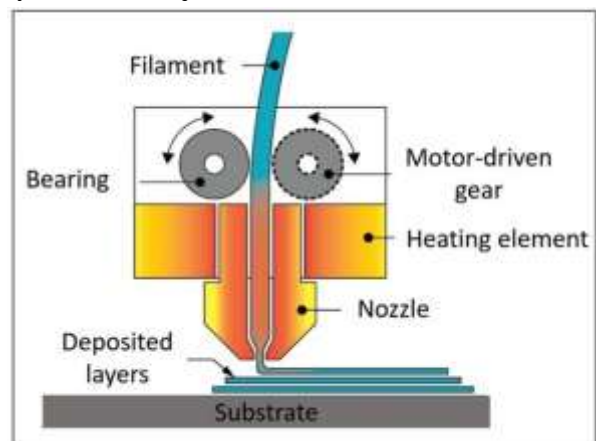
รูปที่ 5 ตัวอย่างการพิมพ์แบบคานยื่น และขั้นบันได

### 2.3 หลักการพิมพ์วัสดุขึ้นงานคอนกรีตด้วยเทคโนโลยี 3 มิติ แบบ FDM

(ณัฐภา เวสสะภักดี. 2022 : 13)

#### 1. Extrusion Deposition

ใช้กระบวนการสร้างโมเดลจากการฉีดวัสดุออกมาจากหัวพิมพ์ในรูปแบบของเส้นใย หรือชั้นบาง ๆ ตามแนวตั้ง และแนวนอน โดยที่วัสดุนั้นจะมีความนิ่ง และแข็งตั้งแต่การฉีดออกจนถึงการแข็งตัวของเส้นใยหรือชั้นที่ถูกสร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การพิมพ์แบบ Extrusion Deposition

#### 2. Powder Bed and Inkjet Head

ใช้กระบวนการสร้างโมเดลจากการนำเอาวัสดุเป็นรูปผง และใช้หัวพิมพ์อิงเจ็ทหรือหัวพิมพ์จากหัวพิมพ์ประทับหรือจากเข็มฉีดยาหรือเจ็ทหัว

ที่พิมพ์หยดหรือฉีดยอดของหมึกหรือวัสดุเข้าไปบนพื้นผิวเพื่อสร้างแต่ ละชั้นของโมเดล โดยส่วนใหญ่ใช้กับวัสดุที่เป็นผงเช่น พลาสติกหรือโลหะ

การออกแบบศาลาอเนกประสงค์โดยชนบท คักคานรเศรษฐ์พบว่ารูปทรง เรขาคณิตเชิงเส้นโค้งที่ใช้วัสดุคอนกรีตมีอุปสรรคในการทำงาน ดังนั้นจึงมี ข้อดีและข้อจำกัดของการออกแบบและการก่อสร้างนี้

รูปแบบการพิมพ์เส้นคอนกรีตมักจะต้องการแปลงวัตถุออกมาใน รูปแบบของเส้นที่ซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ โดยปกติการพิมพ์จะประกอบด้วย ส่วนประกอบ 2 ส่วน ได้แก่

1. เปลือก (Shell): เป็นบริเวณของกรอบด้านนอกสุดของรูปทรง
2. ส่วนเติมเต็ม (Infill): เป็นบริเวณภายในของเปลือก ที่

การออกแบบลักษณะของเปลือกและส่วนเติมเต็มจะมีผลต่อความ แข็งแรงและการรับน้ำหนักของโครงสร้าง โดยการปรับเปลือกและส่วนเติม เต็มจะส่งผลต่อการกระจายแรงและการรับน้ำหนักตามตัวอย่างการ ออกแบบลักษณะเปลือกและส่วนเติมเต็ม การปรับแต่งรูปแบบเปลือกและ ส่วนเติมเต็มจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักและความแข็งแรง ของโครงสร้าง

#### 2.4 การหาความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

แรงเฉือนต้านทานโดยคอนกรีตกรณีที่มีคานมีแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ต่อหน้านั้นคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$V_c = 0.17\lambda\sqrt{f'_c} b_w d \quad (1)$$

$\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเป็นคอนกรีตทั่วไป,  $f'_c$  คือค่ากำลังอัดของ คอนกรีตซึ่งได้จากการทดสอบ,  $b_w$  คือระยะความกว้างของคาน,  $d$  คือ ระยะระหว่างหลังคานถึงเหล็กเสริมล่าง และ  $V_c$  คือแรงเฉือนต้านทานโดย คอนกรีต

เหล็กเสริมรับแรงเฉือน กรณีเหล็กปลอกตั้งฉากกับแนวคานคำนวณได้ ดังสมการที่ (2)

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2)$$

$A_v$  คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก,  $f_{yt}$  คือกำลังครากของเหล็ก ปลอก,  $d$  คือระยะระหว่างหลังคานถึงเหล็กเสริมล่าง,  $s$  คือระยะห่างของ เหล็กปลอก และ  $V_s$  คือแรงเฉือนต้านทานโดยเหล็กตีรอบ

#### 2.5 Transform Section for Composite Beam

Transform Section for Composite Beam คือหลักการคำนวณ คานประกอบที่ประกอบด้วยวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิด โดยทำการแปลงวัสดุ ทั้งหมดให้กลายเป็นวัสดุเพียงหนึ่งเดียวคำนวณได้ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$n = \frac{E_{material}}{E_{reference}} \quad (3)$$

$E$  คือค่า Young's Modulus ของวัสดุ และ  $n$  คือค่าจำนวนเท่า ของความกว้างที่เปลี่ยนไปเมื่อแปลงวัสดุจาก Young's modulus น้อยกว่า ไปเป็นมากกว่า

$$b' = nb \quad (4)$$

$b$  คือความกว้างของคานตอนแรก และ  $b'$  คือความกว้างของคานหลัง เปลี่ยนวัสดุด้วยหลักการ Transform Section for Composite Beam

#### 2.6 Shear Stress

Shear Stress คือแรงเฉือนต่อพื้นที่ที่รับแรงเฉือนนั้น มีสูตรการ คำนวณดังนี้

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (5)$$

$V$  คือแรงเฉือนที่กระทำบนโครงสร้าง,  $Q$  คือโมเมนต์เฉือนของพื้นที่ โครงสร้าง,  $I$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของโครงสร้าง และ  $t$  คือความยาว ของด้านที่รับแรงเฉือน

$$\tau_{max} = \frac{1.5V}{A}$$

$\tau_{max}$  คือ Shear stress ที่มีค่าสูงสุดในคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า,  $V$  คือแรงเฉือนที่กระทำบนโครงสร้าง, และ  $A$  = พื้นที่หน้าตัดของคานที่รับ แรงเฉือน

#### 2.7 ลักษณะแตกร้าวในคานคอนกรีต

ลักษณะการแตกร้าวในคานคอนกรีตสามารถจำแนกออกเป็น 5 รูปแบบ ดังต่อไปนี้การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงดัด (ณฐภา เวสสะ ภัทที. 2022 : 31)

##### 1. การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงดัด

เป็นปรากฏการณ์ที่คานคอนกรีตเกิดการโก่งตัว และเกิดรอย ร้าวเนื่องจากคานรับน้ำหนักเกินกว่าที่ออกแบบไว้ ส่งผลให้คานโก่งตัว บริเวณกึ่งกลาง และเกิดรอยร้าวที่ด้านล่างของคาน การวิบัติแบบแรงดัด (Flexural failure) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อคานสามารถรับแรงเฉือนได้มากกว่า แรงดัดที่เกิดขึ้น โดยการวิบัติของแรงดัดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

1.1 การวิบัติของแรงดัดที่เกิดจากแรงดึง (Flexural Tension Failure) เกิดขึ้นเมื่อเหล็กรับแรงดึงไม่สามารถคืนสภาพได้ ส่งผลให้บริเวณ ที่รับแรงอัดเกิดการแตกหัก รอยร้าวจะเกิดขึ้นบริเวณคานที่รับแรงดึง จากนั้นรอยร้าวจะแตกขึ้นไปในแนวตั้งไปยังบริเวณที่รับแรงอัด

1.2 การวิบัติของแรงดัดที่เกิดจากแรงอัด (Flexural Compression Failure) เกิดขึ้นเมื่อบริเวณคานที่รับแรงอัดเกิดการแตกหัก ของคอนกรีต ส่งผลให้เหล็กรับแรงดึงรับแรงจนกระทั่งไม่สามารถคืนสภาพ เดิมได้ รอยร้าวจะเกิดขึ้นอย่างกะทันหัน และรุนแรงในบริเวณที่รับแรงอัด

1.3 การวิบัติของแรงดัดที่เกิดจากแรงดึงและแรงอัดเท่ากัน (Balanced Failure) เกิดขึ้นเมื่อปริมาณเสริมเหล็กในคานเท่ากับอัตราส่วน การเสริมแรงที่สมดุล การวิบัติในลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อทั้งแรงดึง และแรงอัด มีค่าเท่ากัน ลักษณะของการแตกร้าวจะมีการกระจายตัวทั้งแนวตั้ง และ แนวนอนในพื้นที่กว้างของคาน

##### 2. การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงเฉือน

การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงเฉือน (Shear Cracks) มัก เกิดขึ้นเมื่อคานรับน้ำหนักมากเกินไปที่ออกแบบไว้ ส่งผลให้บริเวณจุด รองรับน้ำหนักของคานเกิดรอยร้าวที่ทำมุมประมาณ 45 องศากับแนวตั้ง และมีความยาวตลอดความลึกของคาน ดังแสดงในรูปที่ 7(ข) การวิบัติแบบ

แรงเฉือนจะเกิดขึ้นเมื่อคานมีความต้านทานแรงเฉือนน้อยกว่าแรงคัต โดยปกติการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะใส่เหล็กปลอก (Stirrups) เพื่อป้องกันการวิบัติดังกล่าว การวิบัติเพราะแรงเฉือนสามารถแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้

2.1 การวิบัติของแรงดึงในแนวทแยง (Diagonal Tension Failure) เกิดขึ้นจากการที่รอยร้าวพัฒนาจากแรงคัตที่บริเวณด้านล่างของกึ่งกลางคาน เมื่อมีแรงกระทำมากขึ้น รอยร้าวนี้จะเพิ่มทั้งในด้านกว้าง ยาว และความโค้งงอในแนวทแยง หลังจากนั้นคอนกรีตจะแตกหักอย่างกะทันหัน

2.2 การวิบัติของแรงเฉือนที่เกิดจากแรงอัด (Shear Compression Failure) เกิดขึ้นจากการพัฒนาของรอยร้าวในหน้าตัดคานและแพร่กระจายไปในส่วนที่รับแรงอัดของคาน จนกระทั่งคานเกิดการแตกหักเมื่อคอนกรีตไม่สามารถรับแรงอัดได้

2.3 การวิบัติแบบแยกส่วนที่เกิดจากแรงเฉือน (Splitting Shear Failure) โดยทั่วไปมักเกิดกับคานสีก เมื่อแรงกระทำถูกถ่ายโอนไปยังส่วนที่รองรับโดยตรง จะทำให้เกิดแรงเฉือนมากกว่าแรงคัตที่เกิดขึ้นในคานปกติ

2.4 การวิบัติของการยึดติด (Anchorage Failure) การแยกส่วนของคอนกรีตตามแนวเหล็กเสริมตามยาวก่อนที่จะเกิดการวิบัติแบบอัด

3. การแตกร้าวของคานที่เกิดจากการทรุดตัวต่างระดับของเสาหรือฐานราก

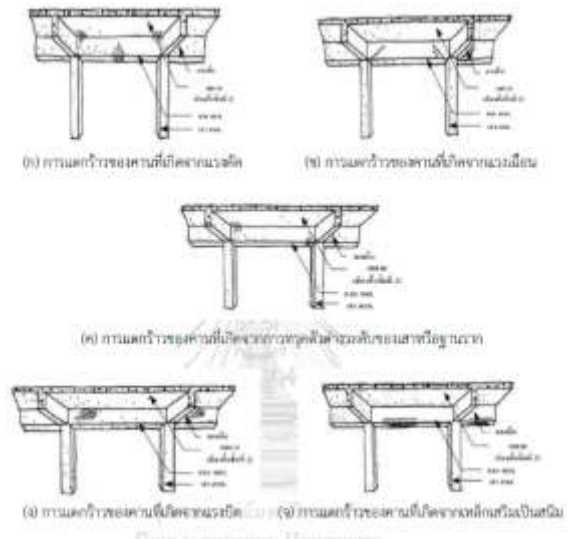
เนื่องจากการทรุดตัวที่ต่างระดับกันทำให้คานรับแรงคัตมากเกินไปกว่าที่ออกแบบไว้ทำให้เกิดรอยร้าวในแนวตั้งหรือเอียงทำมุมกับแนวตั้งไม่เกิน 45 องศา แสดงรูปที่ 7(ค)

4. การแตกร้าวของคานที่เกิดจากแรงบิด

การแตกร้าวลักษณะนี้มักไม่เกิดให้เห็น หากเกิดจะมีลักษณะคล้ายกับการแตกร้าวที่เกิดจากแรงเฉือน แต่การแตกร้าวจากแรงบิดจะทำให้เกิดรอยร้าวเล็กๆ เป็นเส้นขนานจำนวนมาก

5. การแตกร้าวของคานที่เป็นสนิมเหล็ก

การแตกร้าวลักษณะนี้เกิดจากเหล็กเสริมเป็นสนิมทวมตันทำให้คอนกรีตที่หุ้มอยู่แตกออก โดยรอยร้าวจะเกิดเป็นแนวราบยาวขนานกับเหล็กเสริมมักจะพบที่ใต้คานหรือขอบด้านล่างของคาน



รูปที่ 7 ลักษณะการแตกร้าวในคาน

### 3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย เท่ากับ 280 ksc (จากการทดลองกดอัดคอนกรีต)

2. มอร์ตาร์สำหรับพิมพ์แบบหล่อจากการพิมพ์สามมิติ

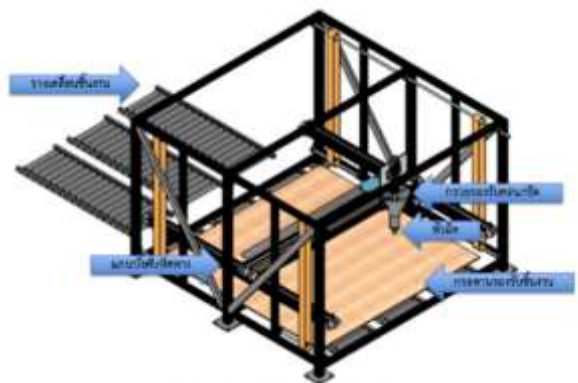
##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. โฟม

2. เครื่องผสมคอนกรีต

3. เครื่องพิมพ์สามมิติแบบ Fused Deposition Modeling

(FDM)



รูปที่ 8 เครื่องพิมพ์สามมิติแบบ FDM

4. เครื่องทดสอบภายใต้แรงกด (Compression Testing Machine)





รูปที่ 9 เครื่องทดสอบ

### 5. Starin Gauge

#### 3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการผลิตแบบทดสอบที่ใช้ทดสอบการเชื่อมประสานของคอนกรีตหล่อในที่ กับ แบบหล่อจากการพิมพ์สามมิติ แบบ FDM หรือ การรับแรงเฉือนของเทคโนโลยี การพิมพ์สามมิติ & แบบหล่อถาวรด้วยการที่เทคอนกรีตหล่อในที่ใส่แบบหล่อคอนกรีตจาก การพิมพ์สามมิติ แล้วนำมาทดสอบภายใต้แรงกด (Compression) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและการวิบัติที่เกิดขึ้น โดยมีขั้นตอนการวิจัย แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.2.1 เตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สถานที่ในการวิจัยครั้งนี้คือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ บริษัทเอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด เพื่อจัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการผลิตตัวอย่างทดสอบแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ โดยสามารถสรุปรายละเอียดที่ใช้ในการผลิตได้ดังนี้

##### 3.2.1.1 มอร์ตาร์ที่ใช้ในการพิมพ์แบบหล่อคอนกรีต

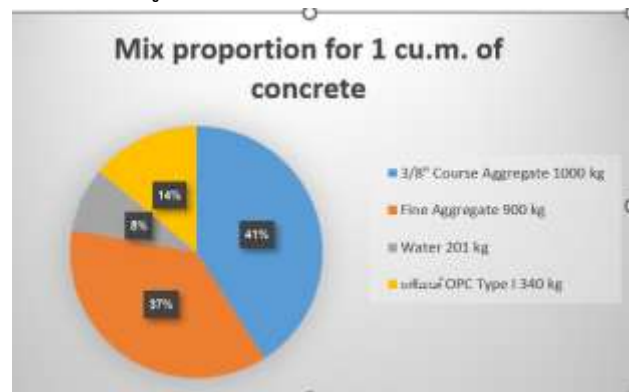
ชนิดที่นำมาใช้ในการทำการทดสอบคือ NN550 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติมอร์ตาร์ที่ใช้ในเครื่องพิมพ์สามมิติ

Properties	ASTM	Unit	NN550
Water content	-	%	12 - 14
Maximum size of particle	C38	mm	1.1
Density	-	kg/m <sup>3</sup>	-
• Wet	-	-	2,000 - 2,200
• Dry (28 days)	-	-	1,800 - 1,600
Workability	-	-	-
• Penetration depth	C780	mm	45 - 60
Setting time	-	min	-
• Initial set	C807	min	110 - 150
Compressive strength	-	MPa	-
• 7 days	C109	MPa	≥ 60
• 28 days	-	MPa	≥ 80
Flexural strength - 28 days	C348	MPa	12
Drying shrinkage - 28 days	C106	%	0.048
Recommended layer time	-	min	4 - 10
Recommended layer thickness	-	mm	0.5 - 2 cm

##### 3.2.1.2 คอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้สนใจกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 3, 7 และ 14 วัน โดยมีอัตราของส่วนผสมคือ ผงซีเมนต์ OPC Type I 340 kg, Course Aggregate 3/8 นิ้ว 1000 kg, Fine Aggregate 900 kg และ น้ำ 201 kg แสดงดังรูปที่ 11



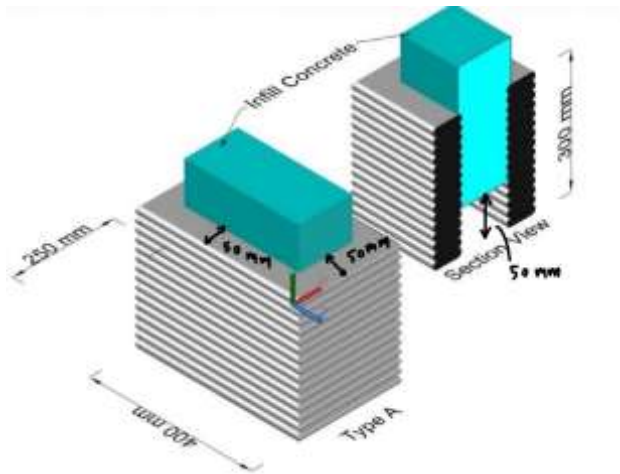
รูปที่ 11 สัดส่วนคอนกรีตกำลังอัดประลัย

ทำการผสมส่วนผสมซึ่งประกอบด้วย ผงซีเมนต์ Course Aggregate Fine Aggregate และน้ำ กันด้วยเครื่องผสมคอนกรีต และเติมน้ำยา Sikament N550 ปริมาณ 4500 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ปรับเพิ่ม - ลด ปริมาณได้ตามความเหมาะสม) จากนั้นเทเข้าแบบหล่อคอนกรีตจาก การพิมพ์สามมิติ ที่มีการปรับแต่งด้วยโฟมเพื่อให้ได้ระยะ และรูปทรงตามที่ต้องการออกแบบการทดลองไว้

##### 3.2.2 การเตรียมแบบทดสอบ

ทำการพิมพ์แบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ ที่มีขนาดกว้าง (B) x สูง (H) x ยาว (L) เท่ากับ 25 X 40 X 30 cm<sup>3</sup> จากนั้นจะมีการเตรียม

แบบหล่อ เช่น การติดตั้งโฟม แล้วทำการรอนแบบหล่อมืออายุ เท่ากับ 3, 7, 14 วัน จึงทำการเทคอนกรีตหล่อในที่ เพื่อเตรียมนำไปทดสอบการ Bonding แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ตัวอย่างทดสอบ Type A

### 3.2.3 การทดสอบแรงกด

เมื่อพิมพ์แบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติแล้วเสร็จ จากนั้นทิ้งกรอบแบบไว้ที่ 3, 7 และ 14 วัน จึงทำการเทคอนกรีตหล่อในที่ จึงนำตัวอย่างไปทดสอบแรงกด พร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมการวิบัติที่เกิดขึ้น เนื่องจากกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยสามารถสรุปขั้นตอนการทดสอบได้ดังนี้

- เมื่อทำการพิมพ์แบบหล่อคอนกรีตจาก การพิมพ์สามมิติ จนได้ขนาดของแบบตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาด B x H x L เท่ากับ 25 X 40 X 30 เซนติเมตร จนเสร็จ แสดงดังรูปที่ 13
- ทำการเตรียมตัวอย่างแบบทดสอบให้พร้อมสำหรับการกด เช่น ติดตั้งโฟมสำหรับทำกรอบแบบ
- เมื่อแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ อายุครบ 3, 7, 14 วัน จะทำการเทคอนกรีตหล่อในที่
- ให้ทำการวัดขนาดของตัวอย่างทดสอบ และจดบันทึกข้อมูล
- นำตัวอย่างทดสอบวางบนเครื่องทดสอบที่บริเวณกึ่งกลางของแท่น ให้หัวกดทดสอบอยู่บริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ และมีการวางแผ่นเพลตเพื่อให้สามารถรับแรงกดได้เต็มหน้าตัด
- เปิดเครื่องทดสอบและทำการกดตัวอย่างทดสอบจนกระทั่งเกิดการวิบัติ และทำการบันทึกค่า ของน้ำหนักที่ตกลง พร้อมทั้งสังเกตลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ



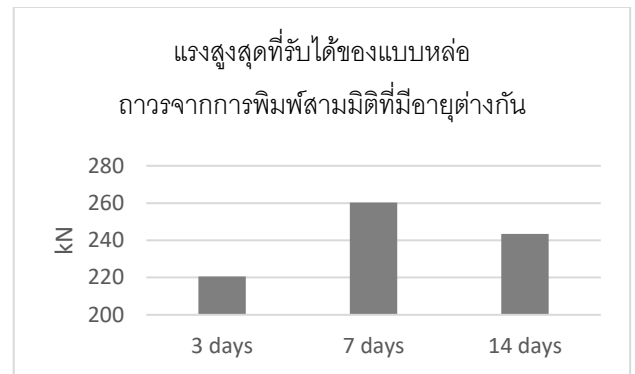
รูปที่ 13 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 14 การทดสอบตัวอย่างทดสอบ Type B

## 4. ผลดำเนินการวิจัย

### 4.1 ผลการทดสอบการรับแรงของตัวอย่างทดสอบ 3, 7 และ 14 วัน



รูปที่ 15 ภาพกราฟแห่งของแรงสูงสุดที่รับได้ของแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติที่มีอายุแตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่า ตัวอย่างทดสอบที่มีแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติที่มีอายุต่างกันได้ผลการทดลองดังนี้

- อายุ 3 วัน สามารถรับแรงสูงสุดเท่ากับ 220.62 kN
- อายุ 7 วัน สามารถรับแรงสูงสุดเท่ากับ 260.34 kN
- อายุ 14 วัน สามารถรับแรงสูงสุดเท่ากับ 243.35 kN

### 4.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบ กับแรงเฉือนที่คานสามารถรับได้ (จากการคำนวณ)

4.2.1 การคำนวณแรงเฉือนที่รับได้ของคานตัวอย่างโดยมาตรฐาน ACI  
จากการคำนวณด้วยวิธีมาตรฐาน ACI จะเห็นได้ว่ากำลังบรรทุกของ  
คานเมื่อพิจารณาจากหน้าตัดจะสามารถรับแรงเฉือนได้ที่ 193.77 kN

#### 4.2.2 ทดสอบการรับแรงเฉือนของคาน

จากการทดสอบการคานที่ใช้เทคโนโลยีแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์  
สามมิติได้ผลการทดสอบว่าคานสามารถรับแรงได้ 290.18 kN ซึ่งมากกว่าที่  
ได้คำนวณไว้ ดังนั้นแสดงว่าผลการคำนวณด้วยวิธี ACI ใช้ได้กับเทคโนโลยี  
แบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติแต่อาจจะทำให้สิ้นเปลืองได้

#### 4.2.3 การคำนวณอัตราส่วนแรงเฉือนต่อพื้นที่

##### 1. คาน

ได้ค่าอัตราส่วนแรงเฉือนต่อความยาวสูงสุดเท่ากับ 2.87 N/mm<sup>2</sup>

##### 2. ตัวอย่างทดสอบ

ได้ค่าอัตราส่วนแรงเฉือนต่อพื้นที่ดังนี้ ตัวอย่างทดสอบที่มีแบบหล่อ  
ถาวรจากการพิมพ์สามมิติอายุ 3 วัน เท่ากับ 0.98 N/mm<sup>2</sup>, 7 วัน เท่ากับ  
1.16 N/mm<sup>2</sup> และ 14 วัน เท่ากับ 1.08 N/mm<sup>2</sup>

## 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการดำเนินการพบว่าอายุของแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สาม  
มิตินั้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการยึดเหนี่ยวของวัสดุที่แตกต่างกันโดยแบบหล่อ  
มีวัสดุคือ มอร์ตาร์ชนิด NN550 จากบริษัท เอสซีซี ซีเมนต์ ส่วนคอนกรีต  
หล่อในที่ที่มีส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรคือ Course Aggregate 3/8 นิ้ว  
1000 kg, Fine Aggregate 900 kg, น้ำ 201 kg และน้ำยา Sikament  
N550 4500 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ปรับได้ตามความเหมาะสม) ซึ่งเป็นวัสดุ  
ที่ต่างชนิดกัน โดยจากผลการทดสอบอัดแรงของแบบตัวอย่างที่มีอายุของ  
แบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติซึ่งประกอบด้วย 3, 7 และ 14 วัน  
พบว่า จากตัวอย่างทั้ง 3 รูปแบบ สามารถเรียงลำดับความสามารถในการ  
รับแรงกดตามลำดับดังนี้

อายุ 7 วัน สามารถรับแรงสูงสุดเท่ากับ 260.34 kN

อายุ 14 วัน สามารถรับแรงสูงสุดเท่ากับ 243.35 kN

อายุ 3 วัน สามารถรับแรงสูงสุดเท่ากับ 220.62 kN

เมื่อนำผลทดลองมาคำนวณค่าอัตราส่วนแรงเฉือนต่อพื้นที่ด้วยการหาร  
พื้นที่ผิวสัมผัสที่รับแรงเฉือนซึ่งเท่ากับ 225,000 mm<sup>2</sup> จะสามารถ  
เรียงลำดับค่าอัตราส่วนแรงเฉือนต่อพื้นที่เช่นเดียวกับความสามารถในการ  
รับแรงเฉือนตามลำดับ ดังนี้

อายุ 7 วัน จะมี Shear Stress เท่ากับ 1.16 N/mm<sup>2</sup>

อายุ 14 วัน จะมี Shear Stress เท่ากับ 1.08 N/mm<sup>2</sup>

อายุ 3 วัน จะมี Shear Stress เท่ากับ 0.98 N/mm<sup>2</sup>

จะนำเอามาเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนแรงเฉือนต่อพื้นที่ที่ต้องการ  
โดยคานที่นำมาเปรียบเทียบจะใช้หลักการคำนวณความสามารถการรับแรง  
ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีมาตรฐาน ACI จากการคำนวณคาน  
คอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นตัวอย่างซึ่งรับแรงเฉือนโดย 2 ส่วนได้แก่ 1.

คอนกรีต คำนวณได้เท่ากับ 66.57 kN และ 2.เหล็กรัดรอบ หรือ เหล็ก  
ปลอก คำนวณได้เท่ากับ 127.20 kN โดยเมื่อรวมกันแล้วจะได้ 193.77 kN  
เมื่อนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนแรงเฉือนต่อความยาวจะได้ค่าสูงสุดเท่ากับ  
2.66 N/mm<sup>2</sup>

ผลการทดสอบแรงกดคานที่ใช้เทคโนโลยีแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์  
สามมิติได้ผลการทดสอบว่าคานสามารถรับแรงได้ 290.18 kN ซึ่งมากกว่าที่  
ได้คำนวณไว้ซึ่งคือ 193.77 kN ดังนั้นแสดงว่าผลการคำนวณด้วยวิธี ACI  
ใช้ได้กับ เทคโนโลยีแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติ แต่อาจจะเป็นการ  
สิ้นเปลือง

เมื่อนำมาเปรียบเทียบจะพบว่าแบบทดลองที่มีแบบหล่อถาวรจากการ  
พิมพ์สามมิติ ทั้งอายุ 3, 7 และ 14 วัน มีค่าอัตราส่วนแรงเฉือนต่อพื้นที่ที่  
น้อยกว่าคาน ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างทดสอบ ไม่มีประสิทธิภาพมาก  
พอที่จะรับน้ำหนักบรรทุกได้ ทำให้ไม่ควรเลือกใช้เพื่อความปลอดภัยต่อทั้ง  
ชีวิต และทรัพย์สินของบุคลากรในวงการก่อสร้าง เช่น การเกิดอุบัติเหตุจาก  
การที่คอนกรีตหล่อในที่แยกตัวกับแบบหล่อคอนกรีตจากแบบหล่อถาวร  
จากการพิมพ์สามมิติ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติการรับแรงเฉือนต่อพื้นที่หน้าตัด  
หรือ ค่าอัตราส่วนแรงเฉือนต่อพื้นที่ หรือ คุณสมบัติการยึดเหนี่ยวระหว่าง  
วัสดุของเทคโนโลยีแบบหล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติยังไม่เพียงพอต่อการ  
ใช้งานจริง แต่อย่างไรก็ตามสามารถนำเอาการทดลองนี้ไปต่อยอด และ  
พัฒนาเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงเฉือนด้วยวิธีอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น การใช้  
น้ำยาเชื่อมประสานคอนกรีต หรือ Epoxy และการใส่เหล็กเสริมอย่าง Wire  
Mesh เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเหนี่ยว ซึ่งส่งผลต่อความสามารถใน  
การรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตหล่อในที่ กับ แบบ  
หล่อถาวรจากการพิมพ์สามมิติที่มีอายุต่างกันนี้ มีอาจสำเร็จล่วงได้หาก  
ปราศจากบุคคลดังต่อไปนี้ และที่สำคัญที่สุดในงานวิจัยต้องขอขอบพระคุณ  
คณาจารย์ประกอบด้วยอาจารย์ที่ปรึกษาทรงศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปาน  
สุข ที่ท่านได้คอยให้คำชี้แนะแนวทาง และการแก้ไขปัญหาที่เผชิญในการ  
ทำงานวิจัยครั้งนี้ คุณกันตวิชัย สุพรรณแสง และคุณอธิวัฒน์ ทองณวม ที่  
ช่วยเหลือเรื่องของอุปกรณ์การทดสอบ แนะนำความรู้เกี่ยวกับงานวิจัยที่  
เกี่ยวข้องกับงานโครงสร้างที่พิมพ์สามมิติ และแนะนำการวิเคราะห์งานวิจัย  
ครั้งนี้

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด ที่ช่วยพิมพ์  
กรอบแบบคาน และแบบทดลอง นอกจากนี้ยังให้ความรู้ด้านการใช้งาน  
นวัตกรรมเครื่องพิมพ์สามมิติให้เหมาะสมกับงานศึกษานี้ และสิ่งที่ขาดไม่ได้  
คือการทดสอบ ดังนั้นการทดสอบตัวอย่างคานต่าง ๆ จะไม่สำเร็จเลยหาก  
ปราศจาก คุณอดิสร ขวนปี และคุณสมพงษ์ ชำแจ้ง ที่ช่วยเหลือไม่ว่าจะ  
เป็นด้านข้อมูลการใช้เครื่องมือการทดสอบยกตัวอย่างเช่น การใช้งานเครื่อง  
กด เป็นต้น การส่งเกรดรอยร้าวในตัวอย่างคาน และการวาดรอยร้าวพร้อม



กับระบุแรงกระทำจนกระทั่งการทดสอบตัวอย่างทดสอบสามารถบรรลุผ่าน  
ไปได้ด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI 318-19, A. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)
- [2] Dr. Sandeep Mekkara. (2023). Interfacial Bonding Between 3D Printed and Conventional Concrete: Influence of Bonding Agents and Reinforcement. Chulalongkorn University
- [3] ณิชฎฐา เวสสะภักดิ์, การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ. (2022). Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)
- [4] วัฒนชัย สมิตชากร, การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก Reinforced Concrete Design. (2563). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [5] 3DD Digital Fabrication. (2021). พลิกโฉมวงการก่อสร้าง!! SCG ใช้ 3D Printer สร้างอาคาร Co- Working Space.<https://www.print3dd.com/scgth-print-co-working-space/>