การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของคานจากการใช้แบบด้วยการพิมพ์ 3 มิติ

Study of Behavior of Beams from 3D Printing Formwork

ณัฏฐา เวสสะภักดี[1,*] วิทิต ปานสุข[2] กันตวิชญ์ สุพรรณแสง[3] ลาภยศ ประสิทธิโศภิน[4] และ ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์[5]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
[4] ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
[5] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จ.นครปฐม
**Corresponding author; E-mail address: 6372035321@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันลักษณะการออกแบบทางด้านสถาปัตยกรรมมีความหลากหลายและซับซ้อนมากขึ้นทำให้งานก่อสร้างมักจะประสบปัญหาในการตั้งแบบหล่อชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ เช่น คานโค้ง หรือคานที่เป็นรูปแบบอิสระที่ยากต่อการทำงาน และด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ ที่มีความอิสระต่อการพิมพ์ชิ้นงานต่าง ๆ ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในด้านงานก่อสร้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่ใช้กรอบแบบ (Formwork) จากการพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติด้านการรับกำลังของคานช่วงเดียว (Simple beam) กรอบแบบดังกล่าวถูกพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบระบบฉีดเส้นวัสดุ หรือ Fused Deposition Modeling (FDM) ซึ่งเป็นการพิมพ์คอนกรีตซ้อนกันไปจนได้กรอบแบบ โดยในการวิจัยนี้ได้สร้างกรอบแบบที่มีความสูงของแต่ละชั้นการพิมพ์แตกต่าง 3 แบบ ได้แก่ ชั้นการพิมพ์ความสูง 15.0 mm (BH1.50) 17.5 mm (BH1.75) และ 20.0 mm (BH2.00) และสังเกตลักษณะการวิบัติของคานที่เกิดขึ้น จากนั้นผลการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลเพื่อหาความแตกต่างจากการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติ (NB)

คำสำคัญ: เทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ, การพิมพ์แบบ Fused Deposition Modeling (FDM), คาน, พฤติกรรมการรับแรงดัด

Abstract

Nowadays, Architectural designs are various and complex. Construction workers often faces problems in setting up formwork to construct the structural parts such as curved beams and free-form beams that are difficult to construct. 3D printing has play an important role in construction technology because it can print various workpieces. Therefore, this research aims to study the flexural behavior of concrete formwork beams produced from 3D printing technology by considering the strength properties of simple beams. The frame was printed with Fused Deposition Modeling (FDM) technology, in which the concrete is stacked to form a frame. In this research, 3 types of frames were varied with 3 different heights of each printing layer: 15.0 mm height (BH1.50), 17.5 mm (BH1.75) and 20.0 mm (BH2.00). The failure of the beams are observered. Then, the test results will be analyzed and compared with normal reinforced concrete (NB) beams.

Keywords: 3D printing technology, Fused Deposition Modeling (FDM) printing, beam, flexural behavior

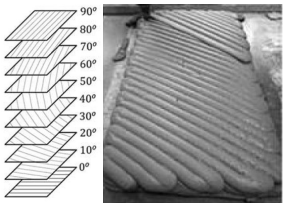
1. คำนำ

เนื่องจากเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้าง และมีรายงานข้อมูลผลการสำรวจเชิงสถิติด้านเศรษฐศาสตร์ในช่วงปี ค.ศ. 2019 พบว่าอุตสาหกรรมการก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ มีมูลค่าประมาณ 19.8 ล้านเหรียญสหรัฐ และมีการคาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2027 จะมีมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็น 477.1 พันล้านเหรียญสหรัฐ โดยคิดอัตราการเติบโตต่อปีเป็นร้อยละ 322.6 ดังนั้นจึงถือได้ว่าเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีบทบาทที่สำคัญ และยังสามารถลดปัญหาค่าแรงงานที่เพิ่มขึ้นในอนาคต [1] โดยลักษณะการทำงานของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในรูปแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) เป็นการพิมพ์ขึ้นรูปวัสดุทีละชั้นด้วยการฉีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) [2] ที่นิยมอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ

เทคโนโลยีนี้มีบทบาทสำคัญเพื่อตอบสนองความต้องการของงานด้านสถาปัตยกรรมในรูปแบบต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น ลวดลายของผนังที่ซับซ้อน หรือการติดตั้งแบบคานโค้งที่มีความยากในเรื่องการก่อสร้าง การใช้เวลาที่ยาวนาน และอาจจะมีผิดพลาดเนื่องจากความสามารถและประสบการณ์ของช่างก่อสร้างเพราะทำให้เกิดการค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมเกินกว่าแผนงานที่วางไว้ อีกทั้งมีการใช้งานไม้แบบที่มากขึ้นยังเป็นสาเหตุของปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เป็นกระบวนการสร้างชิ้นงานขึ้นมาในรูปแบบ 3 มิติ และผลิตวัสดุที่ออกมาเรียงเป็นชั้นจนกระทั่งชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์ โดย

ใช้ข้อมูลดิจิตอลแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในการสร้างชิ้นงานภายใต้การควบคุมการทำงานของคอมพิวเตอร์ ข้อดีของการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ คือ 1. สามารถทำให้คำนวณระยะเวลาการทำงานเพื่อใช้เตรียมแผนงานได้และควบคุมค่าใช้จ่าย 2. สามารถสร้างรูปแบบอาคารที่ซับซ้อนได้ตามความต้องการ เช่น การพิมพ์ผนัง เสา และคานที่มีรูปทรงหลากหลาย และ 3. ลดปริมาณการใช้ไม้แบบ และการใช้ทรัพยากรมนุษย์ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเห็นถึงประโยชน์ของการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวเพื่อศึกษา และวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมของชิ้นงานโครงสร้าง

โดยส่วนใหญ่ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวจะออกแบบเป็นระบบผนังรับแรงของโครงสร้างด้านบน และมีการศึกษาลักษณะของการใช้รูปทรงเรขาคณิตเข้ามาประยุกต์และเน้นรูปแบบความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรม ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาพฤติกรรมของผนังที่ใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ พบว่าการพิมพ์ในลักษณะที่มีทิศทางเดียว (แนวราบ) มีปัญหาเรื่องของพันธะระหว่างชั้นและคุณสมบัติเชิงกลของการแข็งตัวของวัสดุที่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนัก และการโก่งตัว เมื่อศึกษาตัวอย่างการพิมพ์รูปแบบทางเรขาคณิตพบว่าลักษณะการพิมพ์ด้วยรูปแบบมุม 10 องศา (รูปแบบไขว้ กึ่งไอโซทรอปิก และเกลียว) แสดงดังรูปที่ 1 ทำให้มีประโยชน์ต่อการกำลังรับน้ำหนัก และการโก่งตัวเช่นกัน [3-4] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการพิมพ์วัสดุทดแทนการใช้เหล็กเสริมเพื่อรับแรงดัดที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การเสริมแรงเชิงพื้นที่ของคานด้วยการพิมพ์วัสดุพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก โดยที่ลักษณะความสูง และความหนาของพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกที่พิมพ์เป็นเส้นเพื่อเสริมแรงแทนเหล็กเสริม และเติมคอนกรีตลงในแบบชิ้นงานคานตัวอย่างจนกระทั่งเต็ม และนำไปทดสอบปรากฏว่าวัสดุที่ใช้พิมพ์ส่งผลต่อการรับแรงดัดที่เกิดในคาน [5-6] แต่ผู้วิจัยได้ศึกษาการออกแบบอาคาร 2 ชั้น ซึ่งพบว่าการพิมพ์แบบ FMD มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถพิมพ์ซ้อนทับในลักษณะของเหมือนคานยื่นได้ ดังนั้น เมื่อสังเกตแนวผนังชั้นที่ 1 ไม่ตรงกันกับผนังชั้นที่ 2 แสดงดังรูปที่ 2 จะพบว่าเป็นข้อจำกัดของเครื่องมืออยู่ จึงเป็นเหตุผลในการศึกษาครั้งนี้จะเกี่ยวกับระบบการรับแรงของคานที่มีกรอบแบบคาน 3 มิติ และเพื่อนำคานที่ได้ไปวางรับแรงของผนังและพื้นชั้นที่ 2 ของอาคาร



รูปที่ 1 ลักษณะการพิมพ์ด้วยรูปแบบมุม 10 องศา (รูปแบบไขว้ กึ่งไอโซทรอปิก และเกลียว) [4]

รูปที่ 2 ตัวอย่างข้อจำกัดของการพิมพ์ [7]

2. วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย

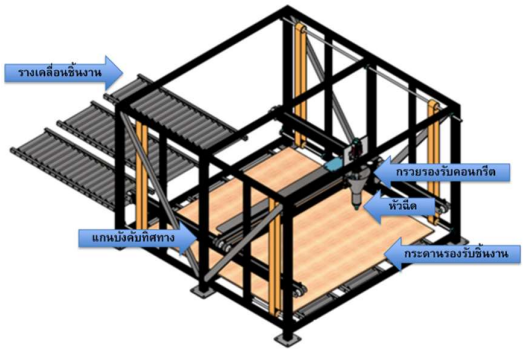
2.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุสำหรับการผลิตตัวอย่างคาน ได้แก่ มอร์ตาร์สำหรับพิมพ์กรอบแบบ คอนกรีต เหล็กขนาด DB16 เหล็กขนาด RB6 กรอบไม้แบบ สเตรนเกจสำหรับติดตั้งบนผิวเหล็กเสริม และผิวคอนกรีต รวมถึงทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer หรือ LVDT)

2.1.2 เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM)

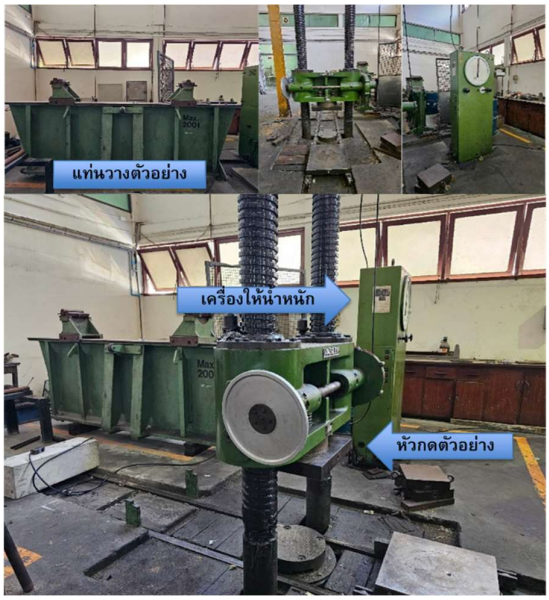
การพิมพ์กรอบแบบคาน 3 มิติ จะใช้วิธีพิมพ์แบบ FMD โดยมีลักษณะเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างเครื่องพิมพ์แบบ FMD

2.1.3 เครื่องกดทดสอบคานภายใต้แรงดัด (Flexural Testing Machine)

เมื่อชิ้นตัวอย่างคานมีอายุ 28 วัน ครบตามที่กำหนดจะถูกนำมาทดสอบโดยใช้เครื่องกดทดสอบคานภายใต้แรงดัด โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องกดทดสอบคานภายใต้แรงดัด (Flexural Testing Machine)

2.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการผลิตคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกรอบแบบคานที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM และนำมาทดสอบด้วยวิธีการทดสอบคานภายใต้แรงดัดที่เกิดขึ้นแบบ 3 จุด เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของคานภายใต้แรงดัด และลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

2.2.1 เตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

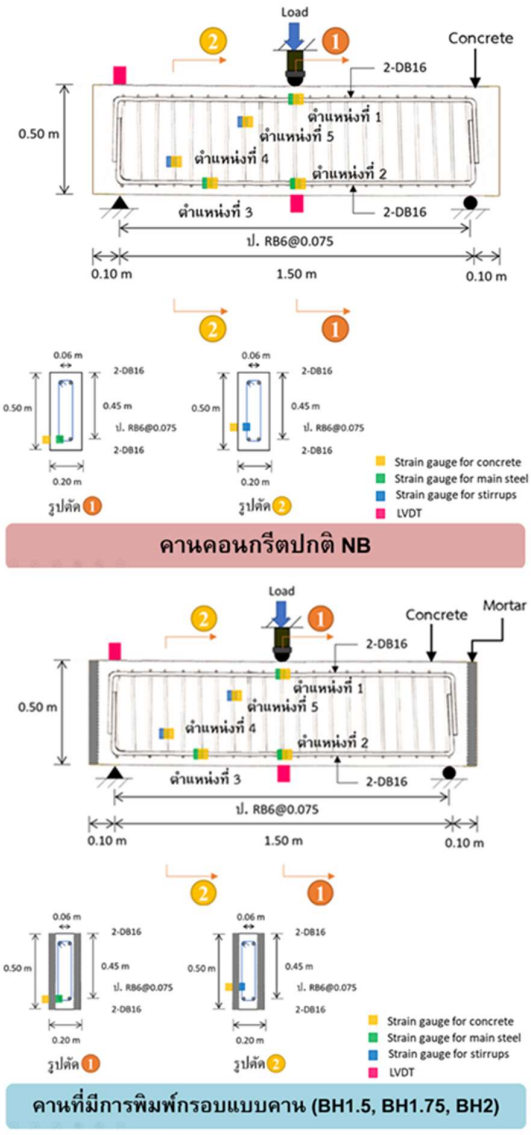
2.2.1.1 มอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับพิมพ์กรอบแบบมีกำลังรับแรงอัดประลัยที่อายุ 1 7 และ 28 วัน เท่ากับ 39.98 82.96 และ 100.46 MPa ตามลำดับ

2.2.1.2 คอนกรีตผสมเสร็จที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยของแท่งทดสอบทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 27.46 MPa

2.2.1.3 เสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm (DB16) ตามมาตรฐาน มอก.24 ที่ชั้นคุณภาพ SD-40 จำนวน 4 เส้น โดยแบ่งเป็นเหล็กล่าง 2 เส้น และเหล็กบน 2 เส้น และเสริมเหล็กปลอกด้วยเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm (RB6) ตามมาตรฐาน มอก.20 ที่ชั้นคุณภาพ SD-24 โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 5

2.2.1.4 กรอบไม้แบบของคานคอนกรีตปกติ (NB) ที่ใช้ในงานศึกษาครั้งนี้มีขนาดกว้าง (B) x สูง (H) x ยาว (L) เท่ากับ 0.20 X 0.50 X 1.70 m

2.2.1.5 ติดตั้งสเตรนเกจสำหรับติดผิวเหล็กเสริม และผิวของคอนกรีต เพื่อวัดค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้น และLVDT เพื่อวัดระยะการโก่งตัวของคานขณะทำการทดสอบ โดยมีตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจ

2.2.2 การออกแบบเสริมเหล็กในคานตัวอย่าง

การศึกษานี้ได้ออกแบบชิ้นตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (SDM) วสท.011008-21 ได้แก่ การออกแบบเสริมเหล็กข้ออ้อย DB16 เพื่อรับแรงดัดที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างตามข้อกำหนดการเสริมเหล็กขั้นต่ำดังสมการที่ (1) และการออกแบบเสริมเหล็กปลอกด้วยเหล็กกลม RB6 เพื่อรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างตามข้อกำหนดการเสริมเหล็กขั้นต่ำดังสมการที่ (2)

$$A_{s_{min}} = \frac{0.25\sqrt{f'_c}bd}{f_y} \geq \frac{1.4}{f_y}bd \quad (1)$$

เมื่อ b : ความกว้างคาน (mm)
d : ความลึกประสิทธิผลของคาน (mm)
f'_c : กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)
f_y : กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (MPa)

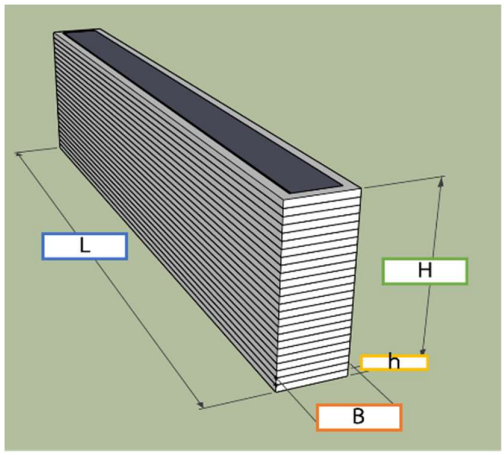
$$A_{v_{min}} = \frac{0.062\sqrt{f'_c}bs}{f_{yt}} \geq \frac{0.35}{f_{yt}}bs \quad (2)$$

เมื่อ b : ความกว้างคาน (mm)
s : ระยะเสริมเหล็กปลอก (mm)
f'_c : กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)
f_{yt} : กำลังดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมทางขวาง (MPa)

2.2.3 ผลิตตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้อ้างอิง และตัวอย่างคานที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พิมพ์กรอบแบบเพื่อผลิตชิ้นงานตัวอย่าง

ผู้วิจัยได้เลือกศึกษาตัวอย่างบ้านอาคาร 2 ชั้นของกรมโยธาธิการและผังเมืองในโครงการแบบบ้านสานฝันของขวัญปีใหม่คนไทยมีความสุข ได้แก่ แบบบ้านอารยสถาปัตย์ 3 และเลือกศึกษาเฉพาะคานชั้นที่ 2 บริเวณระเบียงแสดงรูปที่ 2 โดยมีขนาดกว้าง (B) x สูง (H) x ยาว (L) เท่ากับ 0.20 X 0.50 X 2.20 m แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดความสามารถในการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์แบบ 3 มิติ ทำให้ไม่สามารถพิมพ์กรอบแบบตามขนาดความยาวดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงต้องลดขนาดของคานตัวอย่างเป็น 0.20 X 0.50 X 1.70 m สำหรับชิ้นตัวอย่างคานคอนกรีตปกติ (NB) จะถูกหล่อตามขนาดดังกล่าวและจะเสริมเหล็กรับกำลังโดยวิธีกำลังตามการคำนวณในหัวข้อที่ 2.2.2

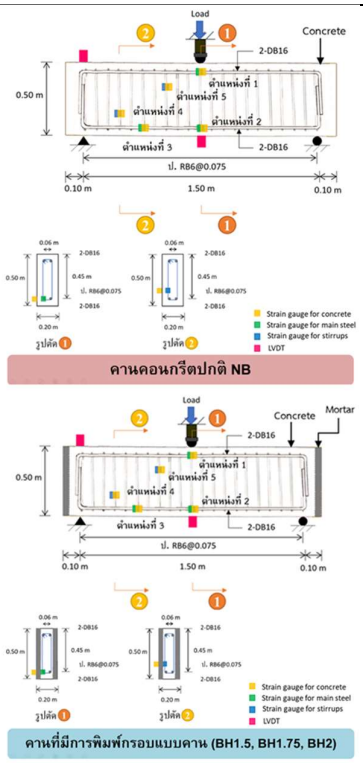
สำหรับชิ้นตัวอย่างคานที่มีกรอบแบบการพิมพ์กรอบแบบจะมีความสูง (h) ของแต่ละชั้นการพิมพ์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ชั้นการพิมพ์ความสูง 15.0 17.5 และ 20.0 mm แสดงดังรูปที่ 5 เมื่อทำการผูกเหล็กคาน และติดตั้งสเตรนเกจที่ผิวเหล็กแล้วเสร็จจึงนำมาใส่ในกรอบแบบ และเทคอนกรีตผสมเสร็จจนกระทั่งเต็มแบบ และมีขั้นตอนการพิมพ์คาน พร้อมกับการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อทำการหล่อคานตัวอย่างเสร็จสิ้นแล้วจะทำการบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน ก่อนทำการทดสอบเพื่อสะท้อนการทำงานจริง



รูปที่ 5 ลักษณะการขึ้นรูปของคาน

1. ลักษณะรูปแบบการพิมพ์

2. ลักษณะการเสริมเหล็ก



3. การเติมคอนกรีตในช่องว่างให้เต็ม

รูปที่ 6 ลักษณะการขึ้นรูปของคาน

2.2.4 การทดสอบแรงดัด (Bending Testing)

ชิ้นตัวอย่างคานจะนำมาทดสอบหาแรงดัดภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด ตามมาตรฐาน ASTM C293 เพื่อทดสอบหาค่าแรงดัดของคาน (Bending Testing) และระยะการโก่งตัวของคานที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมการวิบัติขณะรับแรง

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

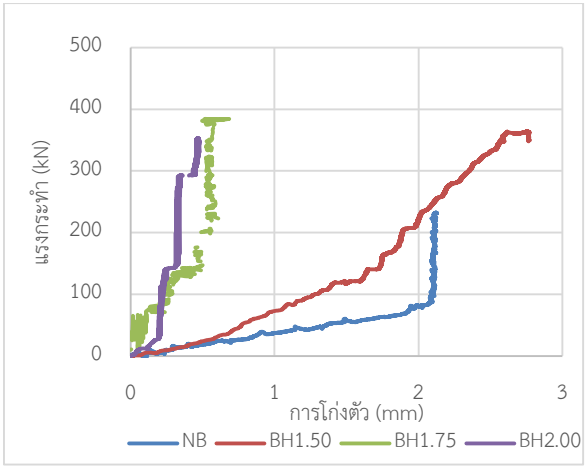
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่ง (Load-Deflection Relationship)

ภาพรวมของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นของคานแต่ละรูปแบบแสดงดังตารางที่ 2 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งของคานแต่ละรูปแบบแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าคานทั้งหมดยกเว้นคาน NB ได้เกิดรอยร้าวในแนวทแยง (แรงเฉือน) และวิบัติ เพราะค่าอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) ของคานทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 2 จึงบ่งบอกได้ว่าเป็นคานลึก (Deep Beam) ซึ่งจะเกิดลักษณะการวิบัติของคานเป็นแบบแรงเฉือน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคาน NB พบว่าเมื่ออัตราส่วนแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเพิ่มขึ้น จะเป็นผลให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด ซึ่งเป็นหนึ่งในพฤติกรรมการวิบัติของคานลึก และเมื่อพิจารณาระยะการโก่งตัวของคานพบว่าการโก่งตัวจะคงที่จนถึงช่วงแรงกระทำประมาณ 90 kN และเมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปพบว่าค่าการโก่งของคานนั้นมีความชันที่มากขึ้นจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ซึ่งสะท้อนถึงความเหนียว (Ductile) ของคาน ดังนั้น การจัดเรียงเหล็กปลอกจึงมีผลต่อการรับแรงดัดของคานลึก [8] แต่มีกรณีคานที่มีกรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ ที่เส้นกรอบตั้งฉากลักษณะคล้ายกับการเสริมเหล็กปลอก และมีค่า a/d น้อยกว่า 2 ซึ่งเป็นคานลึกจะเกิดการวิบัติแบบแรงดัด [9] ดังนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบขนาดคานโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์ที่ให้คานที่ทดสอบทั้งหมดเป็นคานลึก

จากผลการทดสอบพบว่าคาน BH1.75 สามารถรับแรงกระทำได้มากที่สุด และ BH1.50 สามารถรับการโก่งได้มากที่สุด เพราะกรอบแบบคานที่มีความสูงของชั้นพิมพ์ที่น้อยส่งผลให้มีจำนวนชั้นในการพิมพ์กรอบแบบมาก (BH1.75 มีจำนวนชั้นประมาณ 29 ชั้น และ BH1.50 มีจำนวนชั้นประมาณ 34 ชั้น) ทำให้มีความยืดหยุ่นสูงกว่า และอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการรับแรงคือความหนาของเส้นกรอบแบบคาน โดยคาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 มีความหนาของเส้นอยู่ที่ 33.5 44.7 และ 43.0 mm ตามลำดับ พบว่าหากมีความหนามากจะสามารถรับแรงกระทำได้ดี

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคาน

ชื่อชิ้นงาน	แรงกระทำที่มากที่สุด (kN)	แรงเฉือนที่มากที่สุด (kN)	การโก่งที่มากที่สุด (mm)	รูปแบบการวิบัติ
NB	232.35	116.17	2.13	วิบัติจากแรงเฉือน
BH1.50	364.17	182.08	2.78	วิบัติจากแรงเฉือน
BH1.75	384.40	192.20	0.68	วิบัติจากแรงเฉือน
BH2.00	352.47	176.23	0.48	วิบัติจากแรงเฉือน

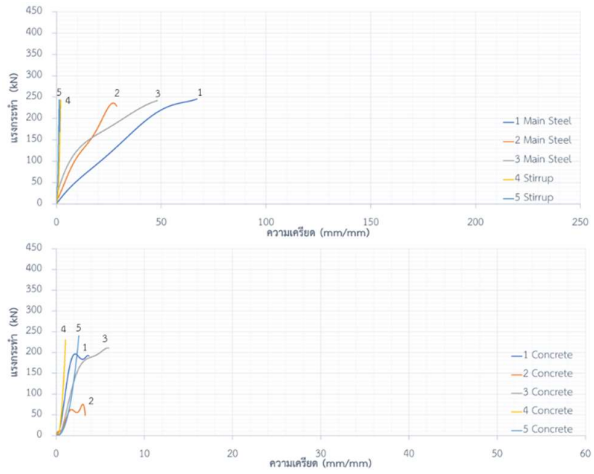


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งของคาน

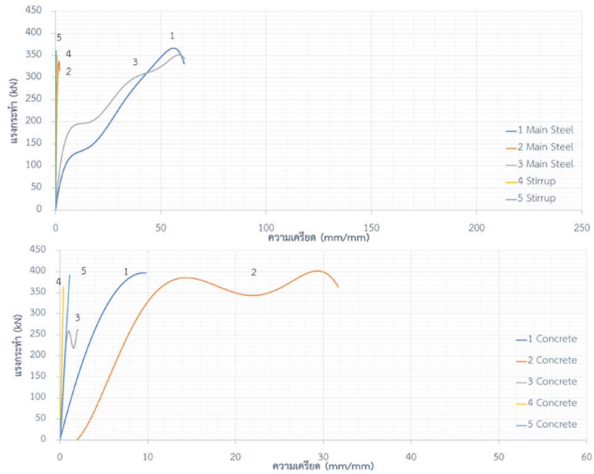
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียด (Load-Strain Relationship)

จากผลของความเครียดดังแสดงในรูปที่ 8 ถึง รูปที่ 12 พบว่าเหล็กล่างที่ตำแหน่งที่ 2 ของคาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 หรือบริเวณกึ่งกลางคานจะเกิดการวิบัติเกิดขึ้นก่อน แต่สำหรับคาน NB จะเกิดการวิบัติตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 5 หรือบริเวณเหล็กปลอกที่อยู่กึ่งกลางคาน จะถูกแรงกระทำด้วยแรงเฉือน และรอยร้าวที่เกิดขึ้นตรงบริเวณผิวคอนกรีตที่ตำแหน่งที่ 3 จะเกิดการวิบัติก่อน และเมื่อดูค่าแรงกระทำต่อคานทั้ง 4 รูปแบบ จะพบว่าคาน BH1.50 BH1.75 และ BH2.00 จะถูกแรงกระทำที่กรอบแบบจนกระทั่งวิบัติก่อน และส่งผลให้เหล็กล่างที่รับแรงดึงเกิดการวิบัติตามไปด้วยจากพฤติกรรมแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าความเครียดน้อย อย่างไรก็ดีผู้วิจัยยังพบว่ามีอีกหลายสาเหตุที่ส่งผลดังกล่าว ได้แก่ มอร์ตาร์ที่ใช้พิมพ์กรอบสามารถรับกำลังอัดได้สูงกว่า

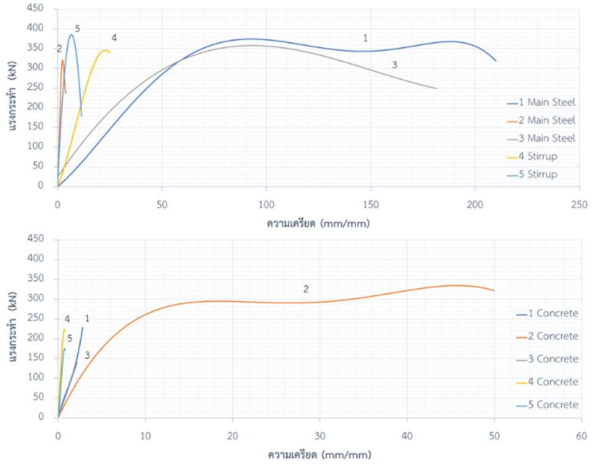
คอนกรีต รวมถึงความสูงและความหนาของชั้นที่พิมพ์กรอบคานจะส่งผลต่อการรับแรงเช่นกัน



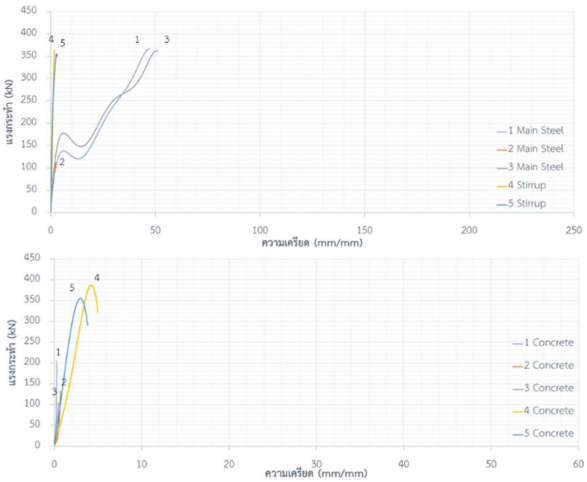
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน NB



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน BH1.50



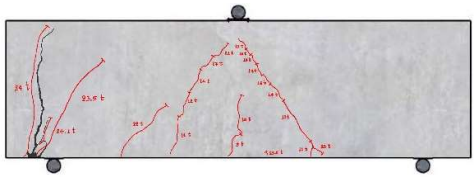
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน BH1.75



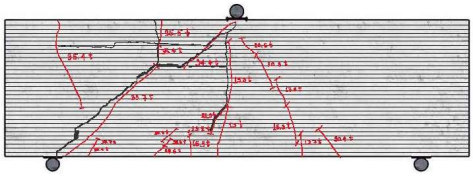
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของคาน BH2.00

3.3 ลักษณะการวิบัติ (Failure Mode)

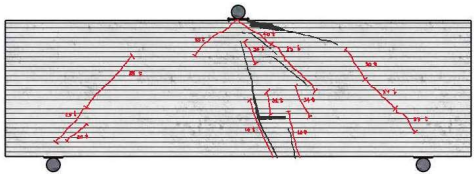
สังเกตได้ว่าการแตกร้าวของคาน BH1.50 BH1.75 และBH2.00 ที่เกิดขึ้นรอยร้าวจะเป็นไปตามรอยต่อระหว่างชั้นคอนกรีตเป็นลักษณะขนานกับเส้นของกรอบพิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 13 และเมื่อเพิ่มแรงกระทำก็จะเป็นไปตามรอยร้าวแบบเฉียง (แรงเฉือน) จะพบว่าการวิบัติในลักษณะนี้เป็นแรงเฉือนจากการถูกบีบอัด (Shear compression) เนื่องจากคานที่ทำการทดสอบเป็นลักษณะของคานลึกดังนั้นพฤติกรรมของคานลึกจะส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแบบไม่เชิงเส้น [10] การเกิดรอยร้าวขึ้นในคาน NB มีลักษณะการวิบัติเป็นแบบแรงเฉือนที่เกิดจุดรองรับ โดยมีข้อมูลการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดของเหล็กปลอกของคาน NB ที่ตำแหน่งที่ 5 เป็นหลักฐานพิสูจน์พฤติกรรมดังกล่าว และรอยร้าวที่จุดรองรับเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีระยะของเหล็กเสริมที่ไม่เพียงพอจึงทำให้รอยร้าวเคลื่อนที่หาบริเวณที่มีความแข็งแรงที่น้อยกว่า



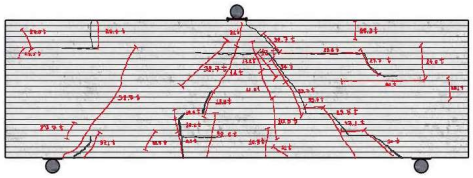
(1) NB



(2) BH1.50



(3) BH1.75



(4) BH2.00

รูปที่ 14 ลักษณะการวิบัติของคาน

4. สรุปผลการวิจัย

ลักษณะพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างคานทั้ง 4 รูปแบบ เป็นคานลึก ซึ่งลักษณะของการวิบัติเป็นแบบแรงเฉือนทั้งหมด โดยคานที่มีกรอบแบบพิมพ์ 3 มิติ จะส่งผลให้การรับกำลังมากกว่าแบบปกติ (NB) อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 51 ถึง 65 แต่สำหรับรูปแบบการพิมพ์กรอบแบบคาน 3 มิติ สำหรับคานลึกจะส่งผลต่อการรับแรงดัด โดยเฉพาะแนวเส้นกรอบแบบที่เป็นเส้นขนานจะสามารถรับกำลังดัดได้ดีกว่าแนวเส้นตั้งฉาก และการวิบัติที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันเนื่องจากแนวเส้นการพิมพ์กรอบที่แนวตั้งฉากจะทำให้เกิดการวิบัติจากแรงดัด แต่แนวเส้นขยายจะเกิดการวิบัติเกิดจากแรงเฉือน อีกทั้งร่องที่เกิดจากการเชื่อมต่อของแต่ละชั้นกรอบแบบพิมพ์ยังสามารถบังคับรอยร้าวที่เกิดขึ้นให้เป็นไปตามร่อง และมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการรับแรงกระทำ ได้แก่ ความสูงของชั้นพิมพ์กรอบคานเนื่องจากกรอบแบบคานมีความสูงของชั้นที่พิมพ์น้อยจะทำให้เกิดการรับแรงได้ดียิ่งขึ้น จึงเห็นได้ว่าความสูงของชั้นกรอบแบบจะแปรผกผันกับการรับแรงกระทำ และความหนาของเส้นชั้นที่พิมพ์กรอบแบบคานจะมีผลต่อการรับแรงแบบแปรผันตรง อีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือการจัดเรียงของเหล็กปลอกที่จะส่งผลต่อการรับแรงดัด เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริษัท เอสซีจี ซิเมนต์ จำกัด

เอกสารอ้างอิง

[1] Dublin, (2021). Business wire, The 3D Concrete Printing - Global Market Trajectory & Analytics report has been added to ResearchAndMarkets.com's.

[2] Hiemenz, J., Stratasys, Inc. (2011). 3D PRINTING WITH FDM: How it Works. *Stratasys*, pp. 1-5.

[3] 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. *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, pp. 646-657.

[4] 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*, Vol. 9, No. 1, pp.46-64.

[5] Katzer, J., Szatkiewicz, T. (2020). Effect of 3D Printed Spatial Reinforcement on Flexural Characteristics of Conventional Morta. *Materials*, 13(14), 3133, pp.1-13.

[6] Nguyen-Van, V., Kumar Choudhry, N., 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*, Vol. 134, 104060, pp.1-14.

[7] มณฑล สุดประเสริฐ และ ทวีเกียรติ ศรีสกุลเมฆี. (2562). แบบบ้านสานฝัน ของขวัญปีใหม่ คนไทยมีสุข บ้านอารยสถาปัตย์ 3. *กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย*, หน้า 1-103.

[8] Atteshamuddin S. Sayyad, Subhash V. P atankar. (2013). Effect of Stirrups Orientation on Flexural Response of RC Deep Beams. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol. 1, No. 5, pp.107-111.

[9] Gebhard, L., Mata-Falc´on, J., Anton, A., Dillenburger, B., Kaufmann, W. (2021). Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies. *Journal of Construction Research*, Vol. 02, Issue 02, pp.30-42.

[10] ปราชญ์ อมรภิญโญ, จารึก ถีระวงษ์. (2560). พฤติกรรมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก: การทดสอบและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์. *วิศวกรรมสาร มก*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 102, หน้า 73-82.