เทคนิคการก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์

Construction technique employing 3D printing technology with cement material

เศรษวัฒน์1 ติยภูมิ[1], สรวิชญ์2 ระดับปัญญาวุฒิ[2], สิทธิชัย3 พูลสวัสดิ์[3] และ วิทิต ปานสุข[4]
[1,2,3,4] *ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ*

บทคัดย่อ

คอนกรีตมีบทบาทสำคัญอย่างมากเนื่องจากถูกใช้เป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง ด้วยคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงและทนทาน แต่ในการก่อสร้างโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและต้องการความยืดหยุ่น ยังมีข้อจำกัดและพบปัญหาในกระบวนการก่อสร้าง ซึ่งได้แก่ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากฝีมือมนุษย์ ระยะเวลาการก่อสร้างที่ไม่เป็นไปตามกำหนดอันเกิดมาจากกระบวนการก่อสร้างที่มีหลายขั้นตอนประกอบกับข้อจำกัดของวัสดุ ขยะที่เกิดจากการก่อสร้าง และต้นทุนการก่อสร้างที่มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์ขึ้น เพื่อคลี่คลายปัญหาและก้าวข้ามข้อจำกัดในกระบวนการก่อสร้างดังกล่าว งานวิจัยนี้เป็นการทดลองโดยนำเสนอแนวทางในการนำเอาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์มาใช้ในการก่อสร้าง โดยมุ่งเน้นการศึกษาด้าน 1) ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมในการก่อสร้าง 2) รูปแบบและขั้นตอนการก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ 3) ตรวจสอบความเป็นไปได้ในการก่อสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลการวิจัยจะเป็นการเสนอแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างที่จะช่วยพัฒนาองค์ความรู้ในการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ซึ่งจะเข้ามามีบทบาทสำคัญกับวงการก่อสร้างในอนาคต

คำสำคัญ: เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุซีเมนต์, เทคนิคการก่อสร้างด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ, โครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป

Abstract

Because concrete is the primary building material, it plays a critical function. with robust and long-lasting qualities However, in the construction of complicated structures that demand flexibility, this is not the case. In the construction process, there are still restrictions and issues, such as inaccuracies produced by man-made craftsmanship. The multi-stage construction procedure and material constraints are to blame for the unscheduled construction period. Construction waste and expenditures are frequently higher. As a result, cement-based 3D printing technology has been developed. to find solutions to challenges and overcome roadblocks in the construction process This study is an experiment that shows how cement-based 3D printing technology could be used in the construction industry in the future. The research focuses on 1) construction-ready structural systems, 2) construction patterns and steps using 3D printing technology, and 3) assessing the feasibility of construction using the finite element method. The findings of this study will be used to generate design and construction guidelines that will aid in the development of knowledge in the usage of 3D printing technology. which will have a significant future role in the construction industry

Keywords: cement-based 3D printing technology, 3D printer construction technique, Precast concrete structure

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อมอีกทั้งยังมีความเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆ แต่ในปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างกับประสบปัญหาต่างๆทั้งผลิตผลที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่นๆ การขาดแรงงาน ความล่าช้าในการก่อสร้าง รวมถึงราคาวัสดุที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การก่อสร้างมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้น ในประเทศไทยนิยมการก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตเนื่องจากเป็นระบบที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย มีความปลอดภัยสูง ผู้รับเหมาและแรงงานมีความชำนาญในการก่อสร้างเนื่องจากเป็นระบบที่ชำมานาน ใช้เครื่องจักรในการก่อสร้างที่น้อย แต่ก็มีปัญหาในเรื่องผลิตผลที่น้อย มีการใช้วัสดุอย่างสิ้นเปลือง

เพื่อที่จะพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างจึงได้มีการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้อย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ลดระยะเวลาในการก่อสร้าง ลดการใช้วัสดุและแรงงานเพื่อลดค่าใช้จ่ายและลดขยะจากวัสดุในการก่อสร้าง ตัวอย่างเช่น การใช้ระบบคอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งมีรูปแบบการก่อสร้างโดยระบบเสา-คานและระบบผนังรับน้ำหนัก โดยเป็นการหล่อคอนกรีตตามแม่พิมพ์และนำมาประกอบที่พื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้างแต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องต้องใช้ผู้ชำนาญในการก่อสร้าง

เพิ่มระยะในการถอดแบบเนื่องจากมีรอยต่อจำนวนมาก รวมทั้งข้อจำกัดในรูปแบบอาคาร [1-5]

โดยมีเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจซึ่งก็คือ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ โดยเป็นเทคโนโลยีที่เริ่มถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายด้าน เช่น การแพทย์ งานสถาปัตยกรรม รวมถึงนำมาใช้อุตสาหกรรมก่อสร้างซึ่งจะเรียกกว่าการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ เนื่องด้วยเป็นเทคโนโลยีที่ความแม่นยำสูง ใช้เวลาในการผลิตที่น้อย สามารถสร้างชิ้นส่วนได้อย่างอิสระ และช่วยลดการใช้วัสดุ แต่เทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติข้อจำกัดที่จะต้องจึงจารณาค่อนข้างมาก เช่น คุณสมบัติเชิงกลและคุณลักษณะของคอนกรีตที่จะนำมาพิมพ์, ระยะเวลาการแข็งตัว, ระยะเวลาในการพิมพ์, ขนาดของเครื่องพิมพ์, รูปร่างที่จะใช้ในการพิมพ์ ซึ่งส่งผลต่อการออกแบบ [6-13]

ผู้วิจัยจึงออกแบบงานวิจัยนี้โดยการศึกษาแบบแปลนที่ก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตสำเร็จรูปและนำมาเปลี่ยนแปลงเป็นระบบคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อวิเคราะห์แนวทางในการก่อสร้างและนำเสนอแนวทางในการนำเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติมาใช้ในการก่อสร้างและศึกษาความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตสามมิติ

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 ศึกษาแบบบ้านตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

ทางผู้วิจัยได้ศึกษาแบบแปลนอาคารของบ้านแฝด 2 ชั้น โครงการลุมพินี ทาวน์เพลส สุขุมวิท-ศรีนครินทร์ ซึ่งใช้ระบบโครงสร้างแบบคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast) โดยมีผนังเป็นโครงสร้างหลักในการรับแรง และศึกษารายการคำนวณเพื่อนำข้อมูลและรายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆไปปรับใช้ออกแบบโครงสร้างรูปแบบอื่นๆที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างด้วยการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ

2.2 ศึกษาข้อมูลและบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ศึกษาข้อมูลทั้งจากบทความทางวิชาการ มาตรฐาน ตำราเรียน ที่เกี่ยวข้องกับระบบโครงสร้างที่ผู้วิจัยเลือกทั้งระบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตสำเร็จรูป และการก่อสร้างด้วยการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ

2.3 ออกแบบขั้นตอนการทดลอง

2.3.1 ออกแบบขั้นตอนการก่อสร้างโดยการขึ้นโมเดล

จากการศึกษาแบบบ้านแฝด 2 ชั้น โครงการลุมพินี ทาวน์เพลส สุขุมวิท-ศรีนครินทร์ ซึ่งใช้ระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast) ทางผู้วิจัยได้ทำการขึ้นโมเดลบ้านที่ก่อสร้างด้วยเครื่องพิมพ์คอนกรีตสามมิติโดยใช้โปรแกรม Sketch up เพื่อทำแบบจำลองในการก่อสร้างชิ้นส่วนต่างๆของอาคาร อาทิเช่น การพิมพ์คอนกรีตผ่านช่องเปิด การพิมพ์ผนังเสา และคานคอนกรีตเป็นต้น และทำโมเดลอาคารในระบบโครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม Prota structure โดยการนำเอาแบบแปลนจากระบบคอนกรีตสำเร็จรูปมาวางผังเสาและคานเพื่อนำมาออกแบบด้วยระบบคอนกรีตเสริมเหล็กแทน

2.3.2 การออกแบบแบบขั้นตอนการทดสอบเชิงวิศวกรรม

หลังจากการจัดทำแบบจำลองการก่อสร้างอาคารด้วยการพิมพ์สามมิติในข้อ 2.3.1 ทางผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ชิ้นส่วนคานในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม Prota structure เพื่อหาขนาดหน้าตัด จำนวนเหล็กเสริมและขนาดแรงต่างๆที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของคานแต่ละชิ้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite element ในโปรแกรม Ansys Workbench เพื่อหาขนาดของแรงที่ทำให้คานที่ออกแบบได้ถึงจุดวิบัติและนำแรงค่านั้นมาออกแบบคานในระบบการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ เพื่อนำมาเปรียบกันระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบได้จากโปรแกรมProta structure กับคานที่ได้จากการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ทั้งในด้านของขนาดหน้าตัดและจำนวนเหล็กเสริมที่ใช้

2.4 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

วิเคราะห์ข้อมูลจากแบบจำลองการก่อสร้างของระบบการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ และข้อมูลจากการเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นส่วนจากระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก และชิ้นส่วนจากระบบการพิมพ์คอนกรีตสามมิติเพื่อนำไปสรุปเป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบชิ้นส่วนจากการพิมพ์สามมิติให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักเทียบเท่าชิ้นส่วนที่ออกแบบในระบบคอนกรีตเสริมเหล็กและระบบคอนกรีตสำเร็จรูป

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1 ระบบโครงสร้างที่เหมาะสมกับระบบการพิมพ์สามมิติ

จากการศึกษาแบบแปลนบ้านแฝด 2 ชั้น โครงการลุมพินี ทาวน์เพลส สุขุมวิท-ศรีนครินทร์ ซึ่งใช้ระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปโดยมีผนังเป็นโครงสร้างหลักในการรับแรง โดยจากการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติจะพบได้ว่าในการก่อสร้างบ้านจากการพิมพ์คอนกรีตสามมิตินั้นยังสามารถทำได้เพียง1ชั้นหรือ2ชั้นเท่านั้นเนื่องจากความสามารถในการรับแรงยังน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก [7] ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้กำหนดระบบโครงสร้างที่จะนำมาพิจารณาคือระบบเสา-คานโดยมีการเสริมเหล็กในตัวเสาและคานที่ได้จากการพิมพ์คอนกรีตสามมิติเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรง [11]

3.2 ผลลัพธ์การออกแบบขั้นตอนการก่อสร้างโดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ

การก่อสร้างโดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ มีจุดประสงค์เพื่อเป็นทางเลือกในการก่อสร้าง ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ลดปริมาณวัสดุ และของเหลือจากการก่อสร้างลง และมีความยืดหยุ่นในการก่อร้าง โดยขั้นตอนการก่อสร้าง และวิธีการทำงานแตกต่างไปจากการก่อสร้างโดยการหล่อคอนกรีตแบบปกติ อาทิเช่น ไม่มีการใช้ไม้แบบในการก่อสร้าง ใช้เครื่องพิมพ์สามมิติเป็นเครื่องจักรหลักในการก่อสร้าง

อย่างไรก็ดี หลังจากการพิจารณาเรื่องความแข็งแรงของที่อยู่อาศัย จึงเล็งเห็นถึงข้อจำกัดในการก่อสร้างด้วยวิธีการพิมพ์แบบสามมิติ ทั้งนี้ทางผู้วิจัยจึงได้เสนอขั้นตอนและวิธีการสำหรับการก่อสร้างด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยสำหรับส่วนของโครงสร้างที่มีการรับและถ่ายแรง ทางผู้วิจัยเลือกที่จะใช้วิธีการเสริมเหล็กลงในคอนกรีต เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรง ส่วนของผนังจะทำการเติมส่วนของคอนกรีตภายใน เพื่อความแข็งแรงของผนัง

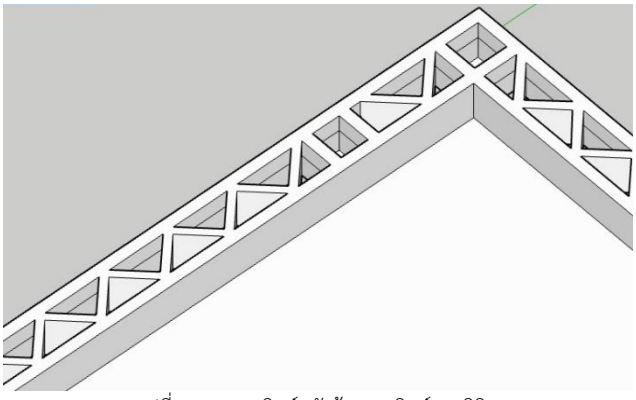
ในขณะที่ความแข็งแรง และความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขั้นตอนการเสริมเหล็กลงในคอนกรีตที่พิมพ์ด้วยระบบสามมิติทำให้การก่อสร้างด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ มีขั้นตอนในการก่อสร้างที่ซับซ้อนละเอียดมากขึ้น จึงทำให้ผู้วิจัยต้องออกแบบขั้นตอนการก่อสร้างที่เหมาะสมขึ้นใหม่สำหรับการก่อสร้างด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติที่มีการเสริมเหล็กในโครงสร้าง

ภายหลังจากการศึกษาแบบบ้านแฝด 2 ชั้น โครงการลุมพินี ทาวน์เพลส สุขุมวิท-ศรีนครินทร์ ซึ่งใช้ระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป Precast ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบขั้นตอนในการก่อสร้างบ้านด้วยการพิมพ์สามมิติ และทำการขึ้นโมเดลขั้นตอนการพิมพ์คอนกรีตสามมิติด้วยโปรแกรม Sketch up

เพื่อทำการจำลองการก่อสร้างในส่วนต่างๆของอาคาร โดยชิ้นส่วนของอาคารที่ต้องพิจารณาในการก่อสร้าง ดังนี้

3.2.1 การพิมพ์ผนังอาคาร

สำหรับผนังอาคารจะไม่มีการเสริมเหล็กในผนัง เพื่อความแข็งแรงจึงทำการเติมส่วนในของคอนกรีตเป็นรูปแบบตาข่าย



รูปที่ 1 ภาพการพิมพ์ผนังด้วยการพิมพ์สามมิติ

3.2.2 การพิมพ์ช่องเปิดอาคาร

ก. การพิมพ์ช่องประตู

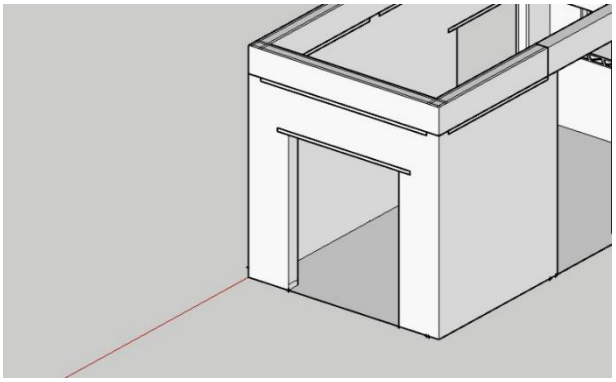
1. พิมพ์ผนังจนถึงระดับขอบบนของประตู โดยเว้นช่องเปิดประตู และเว้นช่องในผนังเพื่อใส่เหล็กเสริม เทียบเท่ากับการทำเสาเอ็นในระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. พิมพ์คอนกรีตต่อเป็นระยะเท่ากับความสูงของเฟรมประตู โดยเว้นช่องสำหรับเสาเอ็น

3. ใส่เหล็กเสริมในช่องว่างสำหรับเสาเอ็น และเทคอนกรีตทับ

4. เมื่อคอนกรีตแห้ง ทำการวางเฟรมประตูรอบด้าน โดยเฟรมด้านบนจะยื่นออกจนทับเสาเอ็น

5. พิมพ์คอนกรีตทับจนถึงระดับบนของผนัง



รูปที่ 2 ภาพการพิมพ์ช่องประตูด้วยการพิมพ์สามมิติ

ข. การพิมพ์ช่องหน้าต่าง

1. พิมพ์ผนังคอนกรีตจนถึงระดับขอบล่างของหน้าต่าง โดยเว้นช่องในผนังเพื่อใส่เหล็กเสริม เทียบเท่ากับการทำเสาเอ็นในระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. พิมพ์ผนังต่อจนถึงระดับขอบบนของหน้าต่าง โดยเว้นช่องเปิดหน้าต่าง

3. พิมพ์คอนกรีตต่อเป็นระยะเท่ากับความสูงของเฟรมหน้าต่าง โดยเว้นช่องสำหรับเสาเอ็น

4. ใส่เหล็กเสริมในช่องว่างสำหรับเสาเอ็น และเทคอนกรีตทับ

5. เมื่อคอนกรีตแห้ง ทำการวางเฟรมหน้าต่างรอบด้าน โดยเฟรมด้านบนจะยื่นออกจนทับเสาเอ็น

6. พิมพ์คอนกรีตทับจนถึงระดับบนของผนัง รอจนคอนกรีตแข็งตัว จึงจะเริ่มขั้นตอนถัดไป

3.2.3 การพิมพ์คาน

ก. การพิมพ์คานบนผนัง

1. พิมพ์ผนังจนถึงระดับใต้ท้องคาน โดยเว้นระยะห่างจากท้องคานเป็นระยะเท่ากับความสูงของวัสดุรับแรง

2. พิมพ์ระดับหัวเสาเพิ่มเป็นระยะเท่ากับความสูงของวัสดุรับแรง

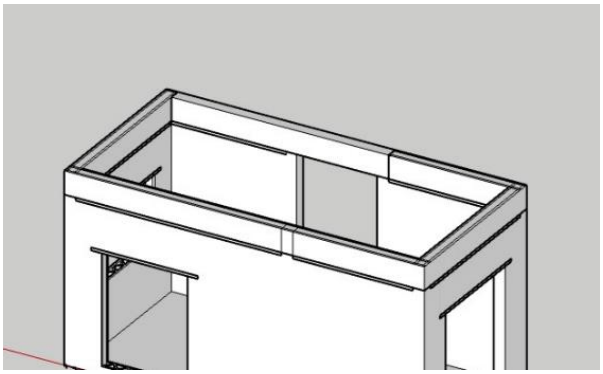
3. นำแผ่นโฟม PU วางกั้นก่อนพิมพ์คานคอนกรีต (เพื่อลดแรงที่เกิดจากน้ำหนักของคานกระทำโดยตรงกับผนังคอนกรีตด้านล่าง)

4. พิมพ์คอนกรีตทับเป็นระยะเท่ากับระยะ covering ของคาน

5. พิมพ์คอนกรีตเพื่อเป็นเสมือนไม้แบบของคาน ความสูงเท่ากับความสูงคาน

6. ใส่เหล็กเส้นและเหล็กปลอกลงตามที่ออกแบบในช่องคอนกรีตที่พิมพ์เป็นไม้แบบ

7. เทคอนกรีตปิดทับ และรอจนคอนกรีตแข็งตัว จึงจะเริ่มขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 3 ภาพการพิมพ์คานบนผนังด้วยการพิมพ์สามมิติ

ข. การพิมพ์คานบนช่องเปิด

1. พิมพ์ช่องเปิดโดยมีความสูงถึงระดับท้องคาน
2. ใช้ค้ำยันบริเวณท้องคานที่เป็นช่องเปิด
3. พิมพ์คอนกรีตทับเป็นระยะเท่ากับระยะ covering ของคาน
4. พิมพ์คอนกรีตเพื่อเป็นเสมือนไม้แบบของคาน ความสูงเท่ากับความสูงคาน
5. ใส่เหล็กเส้นและเหล็กปลอกลงตามที่ออกแบบในช่องคอนกรีตที่พิมพ์เป็นไม้แบบ
6. เทคอนกรีตปิดทับ และรอจนคอนกรีตแข็งตัว จึงจะเริ่มขั้นตอนถัดไป

ค. การพิมพ์คานเดี่ยว

สำหรับคานเดี่ยว จะทำการพิมพ์แยกเป็นชิ้น แล้วจึงนำไปประกอบกับโครงสร้างอาคาร โดยอาศัยข้อต่อแบบเดียวกันกับคาน precast concrete โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. พิมพ์คอนกรีตทับเป็นระยะเท่ากับระยะ covering ของคาน
2. พิมพ์คอนกรีตเพื่อเป็นเสมือนไม้แบบของคาน ความสูงเท่ากับความสูงคาน
3. ใส่เหล็กเส้นและเหล็กปลอกลงตามที่ออกแบบในช่องคอนกรีตที่พิมพ์เป็นไม้แบบ
4. เทคอนกรีตปิดทับ และรอจนคอนกรีตแข็งตัว จึงจะเริ่มขั้นตอนถัดไป
5. ติดตั้งข้อต่อสำหรับเชื่อมเข้ากับโครงสร้างอาคาร
6. ยกคานคอนกรีต ติดตั้งเข้ากับโครงสร้างอาคาร

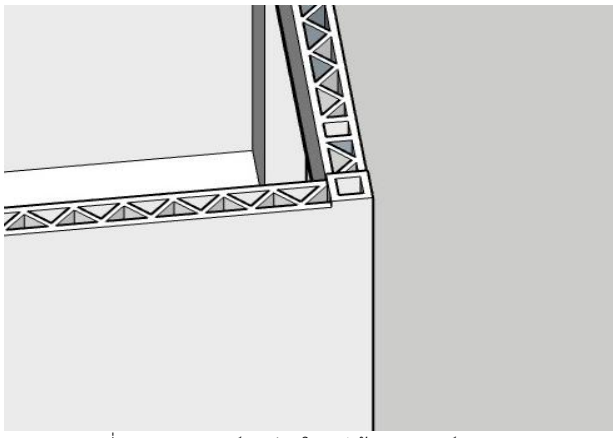
4.2.4 การพิมพ์เสา

ก. การพิมพ์เสาเดี่ยว

1. พิมพ์คอนกรีตเพื่อเป็นไม้แบบสำหรับหล่อเสา เว้นช่องว่างตรงกลางสำหรับใส่เหล็กเสริมโดยมีความสูงเท่ากับความสูงของเสา
2. ใส่เหล็กเสริม และเหล็กปลอกลงในช่องว่างตรงกลางของเสา
3. เทคอนกรีตปิดทับ รอจนคอนกรีตแข็งตัว จึงจะเริ่มขั้นตอนถัดไป

ข. การพิมพ์เสาซ่อนในผนัง

1. ในขั้นตอนการพิมพ์ผนัง เว้นช่องสำหรับโครงสร้างเสา โดยเว้นไว้เป็นระยะเท่ากับขนาดของเสา
2. พิมพ์คอนกรีตจนถึงระดับเดียวกับความสูงของเสาและผนัง
3. ใส่เหล็กปลอกและเหล็กเสริม ลงในช่องว่างตรงกลางเสา
4. เทคอนกรีตปิดทับรอจนคอนกรีตแข็งตัวจึงจะเริ่มขั้นตอนถัดไป

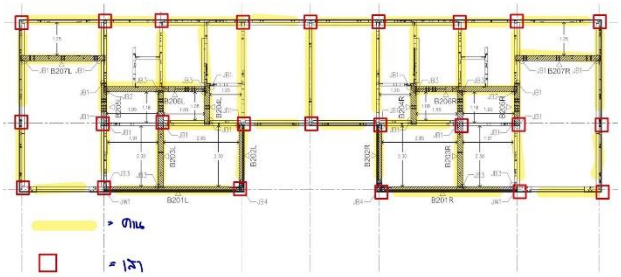


รูปที่ 4 ภาพการพิมพ์เสาซ่อนในผนังด้วยการพิมพ์สามมิติ

3.3 ผลลัพธ์การออกแบบเชิงวิศวกรรม

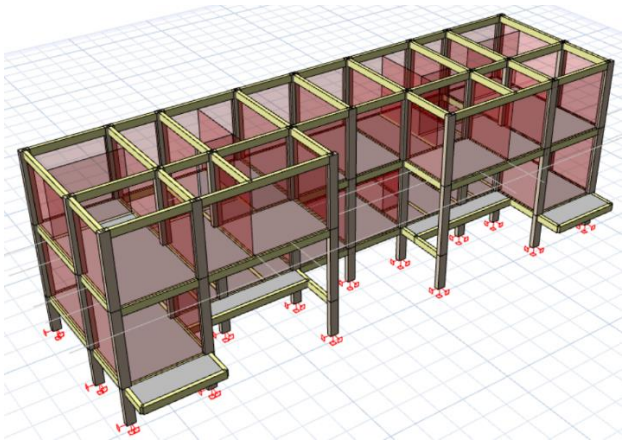
3.3.1 ผลลัพธ์จากการออกแบบคานรองรับพื้นชั้น 2 ในระบบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม Prota structure

เริ่มต้นทางผู้วิจัยได้ทำการวางตำแหน่งของผังเสาและคาน (Keyplan) ในระบบคอนกรีตเสริมเหล็กตามแบบแปลนเดิม



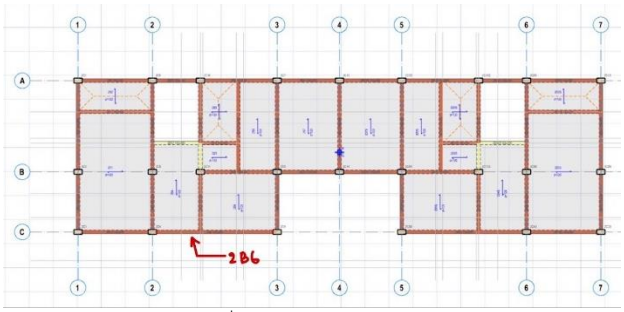
รูปที่ 5 ผังเสาและคานชั้น2ของระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยใช้คอนกรีตที่กำลังรับแรงอัด(f_c') 240 ksc, เหล็กข้ออ้อยเกรด SD-40, เหล็กกลมเกรดSR-24 โดยออกแบบตามมาตรฐาน ACI318-14 และกำหนดขนาดตัดของเสา เท่ากับ 350มม.x200มม. และคานเท่ากับ 150มม.x300มม., พื้นความหนา150มม.และกำแพงหนา150มม.

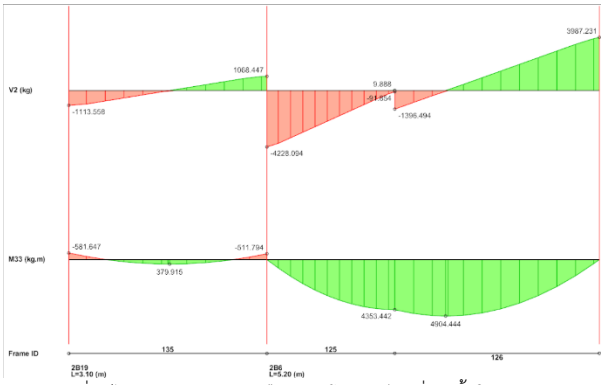


รูปที่ 6 แบบจำลองอาคารจากโปรแกรม

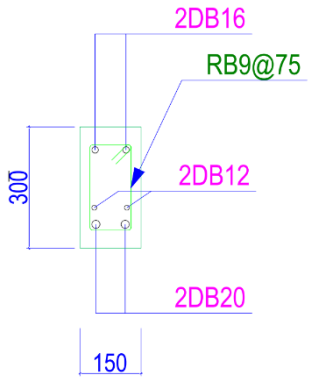
โดยจากการวิเคราะห์ในชิ้นส่วนของคานชั้น2 จะได้ว่าคาน2B6 ซึ่งมีความยาว 5.20 ม.เป็นคานที่รับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงที่สุดโดยมีไดอะแกรมตามรูปที่ 8 และจากการออกแบบจะได้คานขนาดหน้าตัดและเหล็กเสริมที่ต้องใช้ตามรูปที่ 9



รูปที่ 7 ตำแหน่งของคาน 2B6



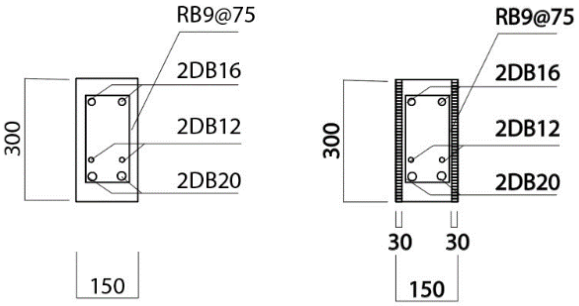
รูปที่ 8 ไดอะแกรมของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคาน 2B6



รูปที่ 9 หน้าตัดและเหล็กเสริมของคาน 2B6

3.4 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ชิ้นส่วนด้วยวิธี Finite element

เพื่อยืนยันและวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของคานที่สร้างโดยการใช้ซีเมนต์ผ่านการพิมพ์สามมิติเพื่อเป็นไม้แบบ และมีการเสริมเหล็กและคอนกรีต ทางผู้วิจัยจึงได้ทำจำลองคาน ทั้งสองรูปแบบได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก และ คานที่พิมพ์จากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ โดยรายละเอียดของคานเป็นดังนี้



รูปที่ 10 หน้าตัดและเหล็กเสริมของคานทั้งสองแบบ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

วัสดุ	ชนิดเอลิเมนต์	คุณสมบัติของวัสดุ	
1	Rebar-DB	Young's Modulus	200,000 MPa
		Poisson Ratio	0.3
		Yield Strength	390 MPa
		Tangent Modulus	20 MPa
2	Rebar-RB	Young's Modulus	200,000 MPa
		Poisson Ratio	0.3
		Yield Strength	240 MPa
		Tangent Modulus	20 MPa
3	Bearing	Young's Modulus	10000 psi
		Poisson Ratio	0.5
4	Solid65	Young's Modulus	23,025 MPa
		Poisson Ratio	0.2
		Uniaxial Compressive Strength	24 MPa
		Uniaxial Tensile Strength	3.05 MPa
		Biaxial Compressive Strength	28.2 MPa
		Dilatancy angle	30 degrees
		Plastic strain at Uniaxial Compressive Strength	0.001

วัสดุ	ชนิดเอลิเมนต์	คุณสมบัติของวัสดุ	วัสดุ
4	Solid65	Ultimate effective plastic strain in compression	0.01
		Relative stress at start nonlinear Hardening	0.4
		Residual compressive relative stress	0.2
		Plastic strain limit in tension	0.01
		Residual tensile relative stress	0.2
5	Solid3Dprint	Young's Modulus	32,562 MPa
		Poisson Ratio	0.2
		Uniaxial Compressive Strength	48 MPa
		Uniaxial Tensile Strength	4.316 MPa
		Biaxial Compressive Strength	55.3 MPa
		Dilatancy angle	30 degrees

3.4.1 เอลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

เอลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักๆ ได้แก่ เอลิเมนต์ที่ใช้แทนเหล็กเสริม เอลิเมนต์ที่ใช้แทนส่วนของคอนกรีต เอลิเมนต์ที่ใช้แทนส่วนของซีเมนต์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ และเอลิเมนต์ที่ใช้แทนส่วนของฐานรองรับ โดยได้แสดงรายละเอียดของแต่ละเอลิเมนต์ไว้ในตาราง 1

ก. เหล็กเสริม

เหล็กเสริมจะแบ่งออกเป็นสองเอลิเมนต์ได้แก่ Stirrup และ Main rebar โดย Stirrup จะมีคุณสมบัติตามเอลิเมนต์ Rebar-RB และ Main rebar จะใช้คุณสมบัติตามเอลิเมนต์ Rebar-DB เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้มีความสามารถในการรองรับความเค้นดึงและความเค้นอัดที่ต่างกัน

ข. คอนกรีต

คานคอนกรีตถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้เอลิเมนต์ชนิด Solid65 เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้มีความสามารถในการแตกร้าวเมื่อความเค้นดึงมีค่ามากกว่าโมดูลัสแตกหัก ทั้งยังมีความสามารถในการแตกหลุด เมื่อเกิดค่าความเค้นอัดมากกว่าค่าที่ยอมให้

ค. ซีเมนต์จากการพิมพ์สามมิติ

ไม้แบบจากคอนกรีตถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้เอลิเมนต์ชนิด Solid3Dprint เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้มีความสามารถในการแตกร้าวเมื่อความเค้นดึงมีค่ามากกว่าโมดูลัสแตกหัก ทั้งยังมีความสามารถในการแตกหลุด เมื่อเกิดค่าความเค้นอัดมากกว่าค่าที่ยอมให้เช่นเดียวกันกับ Solid65 แต่มีความต่างกันในคุณสมบัติ

ง. แผ่นเหล็ก

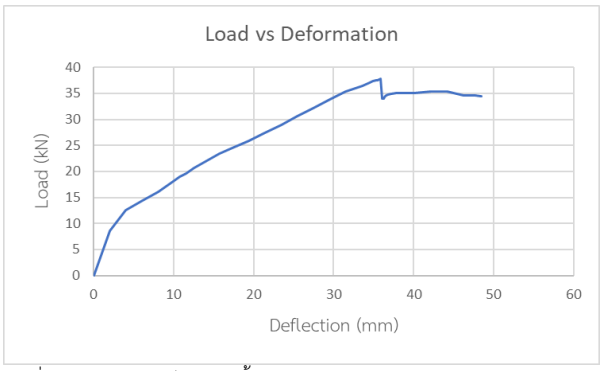
แผ่นเหล็กที่ใช้เป็นฐานรองรับ จะใช้รองรับแรงกดที่เกิดจากการกดคาน

3.4.2 การให้น้ำหนักบรรทุกและเงื่อนไขขอบเขต

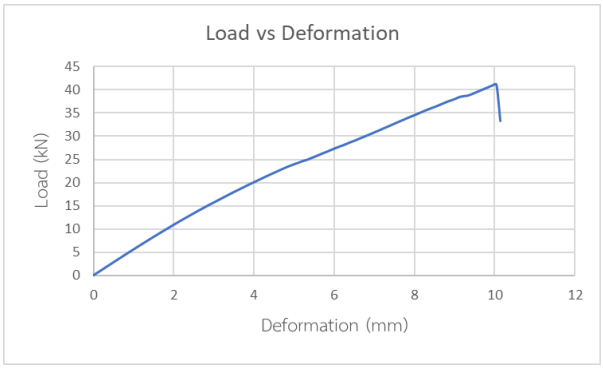
การสร้างแบบจำลองได้ทำการสร้างแบบจำลองเหมือนคานจริง โดยให้ฐานรองรับทั้งสองด้านเป็น fix support คือไม่สามารถเคลื่อนที่และหมุนได้ ส่วนจุดที่ให้น้ำหนักบรรทุกกระทำถูกกำหนดให้เป็นแบบ displacement ซึ่งเป็นระยะ 30 mm

3.4.3 ผลการวิเคราะห์จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการเปรียบเทียบลักษณะการพังของคานที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานที่ใช้การพิมพ์สามมิติมาประยุกต์ใช้ โดยผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของคานทั้ง 2 แบบ เป็นดังนี้



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานคอนกรีต



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตสามมิติ

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ในช่วงแรกพฤติกรรมการรับน้ำหนักจะแปรผันตรงกันกับการแอ่นตัว จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเกินกว่าค่าโมดูลัสการแตกร้าว ทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น โดยพบว่าที่คานคอนกรีตมีค่าอยู่ที่ 8.08 kN ในขณะที่ คานคอนกรีตที่ใช้การพิมพ์สามมิติมาประยุกต์

เกิดการแตกร้าวขึ้นเมื่อบรรทุกน้ำหนัก 9.89 kN ทำการกดต่อไปจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเกินกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานคอนกรีต มีค่า 37.79 kN ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคานคอนกรีตที่ใช้การพิมพ์สามมิติมาประยุกต์ ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 41.05 kN

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางในการนำเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติมาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างและเพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างที่ก่อสร้างด้วยการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาแบบก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตสำเร็จรูปและนำมาปรับเปลี่ยนเป็นระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้นจึงนำระบบการพิมพ์คอนกรีตสามมิติมาประยุกต์ใช้ชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยในชิ้นส่วนที่ต้องรับน้ำหนักจะใช้แทนไม้แบบและมีการเสริมการรับน้ำหนักด้วยการเสริมเหล็กเหมือนชิ้นส่วนจากระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก และในชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับน้ำหนักอย่างเช่นกำแพงก็ใช้การพิมพ์ในรูปแบบตาข่ายเพื่อทำให้กำแพงมีความแข็งแรง จากนั้นก็มีการนำเสนอรูปแบบและขั้นตอนในการพิมพ์ทั้งในส่วนของการพิมพ์ผ่านส่วนต่างๆ เช่น ช่องเปิด, ประตู, หน้าต่าง, เสาและคาน ซึ่งในผลการศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนที่ได้จากการพิมพ์คอนกรีตสามมิติโดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาในชิ้นส่วนของคาน โดยการนำคาน2B6 ซึ่งเป็นคานในระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก มาพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักมาเปรียบเทียบกับคานที่นำการพิมพ์คอนกรีตสามมิติมาประยุกต์ใช้จะพบว่าคานคอนกรีตที่ใช้การพิมพ์สามมิติสามารถรับแรงบรรทุกสูงสุดได้มากกว่าคานคอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการดำเนินงานจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ชูเกียรติ นิมมานนิตย์. (2548). การควบคุมงานก่อสร้างในระบบอุตสาหกรรม.เอกสารประกอบการอบรมโครงการ บ้านเอื้ออาทร,การเคหะแห่งชาติ, กระทรวงพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์

[2] มั่น ศรีเรืองทอง. (2537). เทคโนโลยีสมัยใหม่ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง. การเคหะแห่งชาติ, หน้า 23- 29, กรุงเทพฯ

[3] มามี โตบารมีกุล. (2540). การศึกษาระบบการก่อสร้างอาคารระบบสำเร็จรูปในกรุงเทพและ ปริมณฑล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[4] หลักชัย กลั่นสุวรรณ. (2547). ระบบผลิตภัณฑ์โครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[5] ณัฐวุฒิ ถนอมพวงเสรี. (2549) การวิเคราะห์กระบวนการจัดการชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับงานก่อสร้างที่อยู่อาศัยโดยใช้กรณีศึกษา /. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[6] ชนม์วิชญ์ ธัญญะสุขวณิชย์, ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์, วิทิต ปานสุข. (2564).การศึกษาอัตราส่วนผสมและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์สำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26, 2021, 26.

[7] Rehman, A. U., & Kim, J. (2021). 3D Concrete Printing: A systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics. Materials, 14(14), 3800. doi:10.3390/ma14143800

[8] Xiao, J., Liu, H., Ding, T., & Ma, G. (2021). 3D printed concrete components and structures: An overview. 3D Printed Concrete Components and Structures: An Overview. doi: 10.54113/j.sust.2021.000006

[9] Skibicki, S., Techman, M., Federowicz, K., Olczyk, N., & Hoffmann, M. (2021). Experimental study of hardened Young's modulus for 3D printed mortar. Materials, 14(24), 7643. doi:10.3390/ma14247643

[10] Tay, Y. W., Ting, G. H., Qian, Y., Panda, B., He, L., & Tan, M. J. (2018). Time Gap Effect on bond strength of 3D-printed concrete. Virtual and Physical Prototyping, 14(1), 104-113. doi:10.1080/17452759.2018.1500420

[11] Kloft, H., Empelmann, M., Hack, N., Herrmann, E., & Lowke, D. (2020). Reinforcement strategies for 3d-concrete-printing. Civil Engineering Design, 2(4), 131-139. doi:10.1002/cend.202000022

[12] 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 Book Series, 646-657. doi:10.1007/978-3-030-49916-7_65

[13] Han, X., Yan, J., Liu, M., Huo, L., & Li, J. (2022). Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression. Automation in Construction, 133, 103993. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103993