การวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างคอนกรีตจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ภายใต้แรงกระทำและอุณหภูมิสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

FINITE ELEMENT ANALYSIS ON THE BEHAVIOR OF 3D PRINTED CONCRETE UNDER COMPRESSION AND HIGH TEMPERATURE

บัญญวัต นกโพธิ์[1] มณฑกานต์ ยาพรหม[2] มัณฑนา เม่นขำ[3] และ ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์[4,*]

[1,2,3,4,]ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา จ.นครปฐม ประเทศไทย*
**Corresponding author; E-mail address: totsawat.dau@mahidol.ac.th*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันปัญหาหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างยังคงไม่ได้รับการแก้ไข อาทิ ต้นทุนของวัสดุและค่าแรงที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงความต้องการแรงงานที่มีทักษะในการก่อสร้าง ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ จะช่วยแก้ปัญหาเหล่านั้นได้ แต่เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ยังขาดข้อมูลการศึกษาอยู่มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งพฤติกรรมภายใต้อุณหภูมิสูง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้สร้างแบบจำลองผนังคอนกรีตที่ถูกพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยชุดคำสั่ง ANSYS ซึ่งแบบจำลองมีลักษณะเป็นผนังช้อน 2 ชั้น มีโครงถักอยู่ภายใน โดยผนังมีขนาด กว้าง 12 ซม. ยาว 132 ซม. และสูง 77 ซม. จากนั้นได้การวิเคราะห์ผนังคอนกรีตที่มีแรงกระทำแนวดิ่งภายใต้อุณหภูมิประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของผนังดังกล่าว โดยจากการศึกษาพบว่าผนังคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตลดลงและเกิดการโก่งงอเมื่อเทียบกับผนังคอนกรีตในสภาวะปกติ และประกอบกับเมื่อมีแรงกระทำทั้งแนวดิ่งทำให้เกิดการโก่งตัวของผนังคอนกรีตที่สูงขึ้น

คำสำคัญ: เครื่องพิมพ์ 3 มิติ, คอนกรีต, อุณหภูมิสูง, ไฟไนต์อิลิเมนต์

Abstract

The problems related to construction remain unsolved, e.g., increasing of cost materials and worker and the need of skilled labor. Therefore, using of three-dimensional (3D) printing concrete technology can solve these problems. However, 3D printed concrete structure is still lacking knowledge, especially concrete behavior under high temperature. Thus, a model of 3D printed concrete wall was developed using ANSYS. The wall had dimensions of 12 cm depth. 132 cm width and 77 cm height. After that, the vertical were applied to the model during exposure to high temperature. The results show that the strength of 3D printed concrete wall at high temperature was lower than that of unheated concrete. Additionally, the buckling failure could be observed when the load applying during exposure to high temperature.

Keywords: 3D Printing, Concrete, High Temperature , Finite element

1. บทนำ

การก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบันมีการคิดค้นพัฒนาอุปกรณ์และเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการทำงาน เพื่ออำนวยความสะดวกต่อการก่อสร้าง ช่วยให้ใช้เวลาการก่อสร้างน้อยลง และประหยัดต้นทุนซึ่งมีผลต่อผู้ที่ประกอบกิจการก่อสร้าง หรือผู้รับเหมาที่จะต้องคำนึงถึงความคุ้มค่า ความทนทานและผลกำไรจากการก่อสร้างแต่ละครั้ง อย่างไรก็ดีปัญหาที่ยังค้นพบคือการก่อสร้างล่าช้าและขาดแรงงานซึ่งไม่สอดคล้องกับความต้องการของประชากรที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นสถานการณ์ดังกล่าว เกิดวิกฤตกับตลาดอสังหาริมทรัพย์รวมถึงส่งผลกระทบไปถึงผู้ประกอบกิจการรับเหมาก่อสร้างทุกรูปแบบ เนื่องจากการใช้วิธีการการก่อสร้างแบบเดิมใช้เวลาในการก่อสร้างนาน และใช้ต้นทุนในการก่อสร้างที่สูงจึงมีการพัฒนาหาทางแก้ไขปัญหาเพื่อลดต้นทุนการก่อสร้างโดยทดลองใช้เครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ (3D Printed Concrete) ซึ่งลำดับขั้นตอนในการก่อสร้างและต้นทุนที่ใช้ในการก่อสร้างแต่ละครั้งลดลง [7]

ในการก่อสร้างแบบทั่วไปผู้รับเหมาก่อสร้างจะต้องพบกับปัจจัยที่ทำให้ระยะเวลาในการก่อสร้างนั้นใช้เวลานาน เช่น จำนวนแรงงานไม่พอ เครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้างไม่พร้อมใช้งาน ความไม่ต่อเนื่องของงานเนื่องจากสภาพอากาศ นอกจากนี้ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการก่อสร้างในแต่ละครั้ง เช่น การขนส่งแรงงาน ค่าเช่าที่พักแรงงาน ค่าเช่าอุปกรณ์ค่าวัสดุสิ้นเปลือง เป็นต้น การพัฒนาและการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการก่อสร้างจากเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ (3D Printed Concrete) มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ [8] ที่มีความต้องการให้สิ่งก่อสร้างมีความเหมาะสมสามารถรองรับกับสภาวะต่างๆ [9] โดยสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกๆ คือความสามารถในการรับน้ำหนัก (Load) เพราะเป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบสิ่งก่อสร้าง เช่น ออกแบบสิ่งก่อสร้างเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) หรือเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) อย่างไรก็ตามอุบัติเหตุร้ายแรง เช่น เพลิงไหม้ อาจเกิดขึ้นได้ จึงทำให้การวิเคราะห์ความสามารถในการทนความร้อน (High temperature) จึงเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองผนังคอนกรีตที่ถูกพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของผนังคอนกรีต 3 มิติภายใต้อุณหภูมิสูงและมีแรงกระทำ

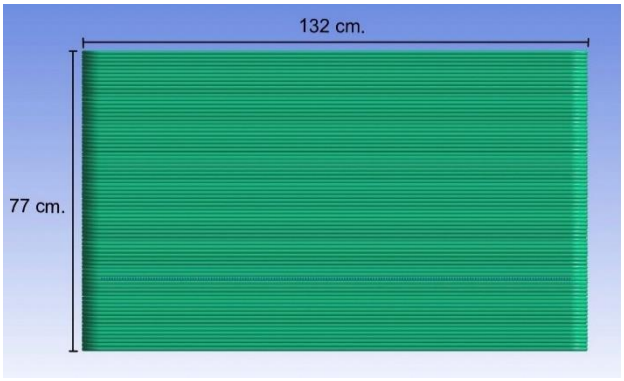
2. ชิ้นตัวอย่างทดสอบ

2.1 แบบจำลอง (Model)

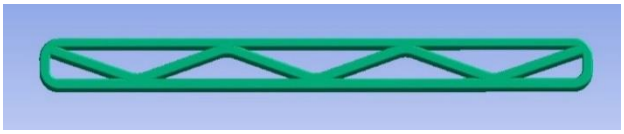
จากการศึกษาผลงานวิจัยในอดีต [1] ที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงในแนวดิ่งของผนังคอนกรีต 3 มิติ พบว่าผนังคอนกรีตแบบ 2 ชั้นที่มีผิวหน้าเรียบและมีโครงถักภายใน (Inner truss) สามารถรับแรงในแนวดิ่งได้ประมาณ 38 เมกะปาสคาล ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้ลักษณะของผนังคอนกรีตแบบ 2 ชั้นดังกล่าวมาเป็นต้นแบบในการวิเคราะห์ โดยผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองผนังคอนกรีตด้วยชุดโปรแกรมคำสั่ง Ansys ขึ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1. ผนังคอนกรีต

เป็นผนังคอนกรีตขนาด กว้าง 12 ซม. ยาว 132 ซม. และ สูง 77 ซม. ซึ่งมีโครงถักอยู่ภายในผนัง ดังในรูปที่ 2(ก) และ 2(ข)



ก.) ขนาดของแบบจำลองผนังคอนกรีต



ข.) ภาพตัดขวางของแบบจำลองผนังคอนกรีต

รูปที่ 1 แบบจำลองผนังคอนกรีต

2.2 คุณสมบัติของแบบจำลอง

แบบจำลองผนังคอนกรีต 3 มิติ ได้กำหนดให้มีคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ดังนี้

- ความหนาแน่นของคอนกรีตเท่ากับ 2,200 กก./ลบ.ม
- กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 39 เมกะปาสคาล
- มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเท่ากับ 25,131 เมกะปาสคาล
- ขนาด Element เท่ากับ 10 ซม.
- จำนวน Node เท่ากับ 754,511 Nodes
- จำนวน Element เท่ากับ 447,249 Elements

เลือกวิเคราะห์ความความร้อนแบบไม่คงตัว กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์ด้านการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาที่เปลี่ยนไป

2.3 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองผนังคอนกรีต

2.3.1 การทดสอบแบบจำลองผนังคอนกรีต

1) กำหนดค่าต่างๆ กับแบบจำลองผนังคอนกรีต

2) วิเคราะห์ผลทดสอบ

3) ทำการศึกษาเพิ่มเติมจากผนังคอนกรีต โดยกำหนดให้มีแรงกระทำในแนวดิ่ง (Vertical Load) ในระหว่างที่อยู่ภายในอุณหภูมิสูงมีค่าเท่ากับ 3.68 เมกะปาสคาล ลงบนผนังคอนกรีตชั้นบนสุด

4) วิเคราะห์ผล

3. ผลการวิเคราะห์

3.1 ผลการวิเคราะห์

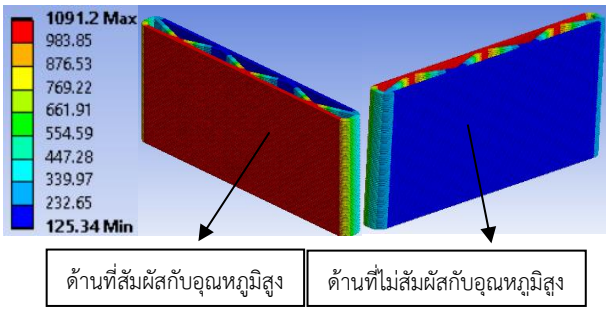
ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในแต่ละบริเวณของผนังคอนกรีต

ตำแหน่ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	ด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง	กึ่งกลางภายในผนังคอนกรีต	ด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิ
1	1,087.40	610.14	130.94
2	1,087.40	738.71	125.45
3	1,087.40	1,084.10	146.96
4	1,087.40	735.13	130.94
5	1,087.40	1,085.2	130.91
6	1,087.40	870.86	125.47
7	1,087.40	839.54	137.36
8	1,087.40	744.85	125.98
9	1,087.40	700.05	131.48
10	1,087.40	1,085.40	128.11
ค่าเฉลี่ย	1,087.40	849.40	131.36

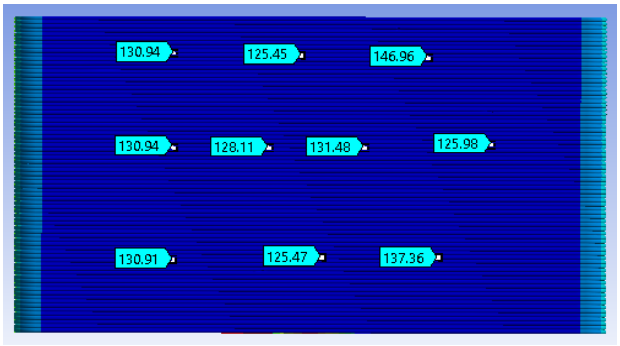
ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของผนังคอนกรีต โดยทำการสุ่มเลือก 10 ตำแหน่งจากแต่ละบริเวณที่แตกต่างกันดังนี้

1. บริเวณผิวด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง
2. บริเวณกลางผนังคอนกรีตลึกจากผิวด้านที่โดนความร้อนประมาณ 6 เซนติเมตร
3. ผิวด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิ

โดย 10 ตำแหน่งดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 3 ซึ่งอุณหภูมิบริเวณผิวด้านที่ให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิจะลดลงที่บริเวณกลางผนังจนถึงบริเวณผิวด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงจะมีอุณหภูมิที่ต่ำที่สุด พบว่าผนังด้านที่ไม่สัมผัสกับแหล่งความร้อนจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 125 - 230 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระดับสีอุณหภูมิของผนังคอนกรีต



รูปที่ 3 ตัวอย่างการสุ่มเลือกตำแหน่ง 10 จุดบริเวณผนังคอนกรีต

3.2 ผลการวิเคราะห์ผนังภายใต้อุณหภูมิสูง

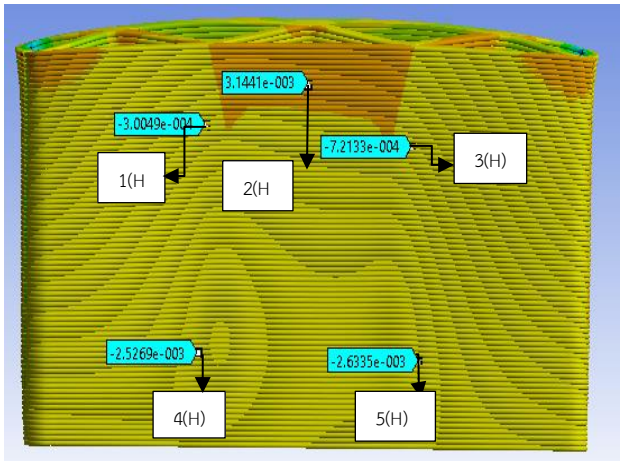
จากการทดสอบผนังคอนกรีตทำให้ทราบถึงค่าความเครียด (strain) และค่าความเค้น (stress) ซึ่งเมื่อทำการสุ่มเลือกในแต่ละบริเวณเพื่อต้องการทราบค่าบนผนังคอนกรีตโดยสุ่มมา 5 ตำแหน่งดังรูปที่ 4 และแสดงค่าความเครียดและค่าความเค้น ดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3

3.2.1. ความเครียด (Strain)

ตารางที่ 2 ค่าความเครียด (Strain) ของผนังคอนกรีตที่มีอุณหภูมิของผนัง

ตำแหน่ง	ค่าความเครียด (Strain) ($x10^{-3}$)	
	ด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง	ด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง
1(H)	-10.482	-0.300
2(H)	-10.843	3.144
3(H)	-10.707	-0.721
4(H)	-13.903	-2.526
5(H)	-15.107	-2.633
1(V)	1.370	-1.211
2(V)	2.448	-0.699
3(V)	1.343	-1.572
4(V)	-2.304	2.627
5(V)	-2.437	3.556

ตารางที่ 2 แสดงค่าความเครียด (Strain) ในแนวนอน (Horizontal) และในแนวตั้ง (Vertical) โดยสัญลักษณ์ (H) แทนค่าความเครียดในแนวนอนและสัญลักษณ์ (V) แทนค่าความเครียดในแนวตั้ง เช่น 1(H) คือค่าความเครียดตำแหน่งที่ 1 ในแนวแกนนอน โดยค่าความเครียดจากการวิเคราะห์ผลในชุดโปรแกรมคำสั่ง Ansys ในแนวนอนของผนังคอนกรีตด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงประมาณ -7.158 x 10^{-3} ถึง 12.007 x 10^{-3} ส่วนด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงประมาณ -26.324 x 10^{-3} ถึง 21.590 x 10^{-3} และค่าความเครียดในแนวตั้งของผนังคอนกรีตด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงประมาณ -2.970 x 10^{-3} ถึง 12.162 x 10^{-3} ส่วนด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงประมาณ -18.104 x 10^{-3} ถึง 4.598 x 10^{-3}



รูปที่ 4 สุ่มเลือกค่าบนผนังคอนกรีต 5 ตำแหน่ง

จากผลการวิเคราะห์ผลค่าความเครียด (Strain) ในแนวนอน (Horizontal) ของทั้ง 2 ด้านของผนังคอนกรีต ด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงมีค่าความเครียดน้อยกว่าด้านตรงข้าม ยกตัวอย่างเช่น ตำแหน่ง 4(H) จะมีค่าความเครียดน้อยกว่าอยู่ประมาณ 420% เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงกว่าจึงมีการหดตัวในแนวนอนมากกว่าด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิ ส่วนค่าความเครียดในแนวตั้ง (Vertical) ค่าความเครียดของทั้งสองด้านมีทั้งค่าบวกและค่าลบ ดังนั้นกำแพงจะมีทั้งการขยายตัวและหดตัวตามบริเวณต่างๆ ซึ่งบริเวณส่วนบนของด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงจะมีค่าความเครียดที่ติดลบ เช่น ตำแหน่ง 1(V) ที่มีค่าเท่ากับ -1.211 x 10^{-3} ดังนั้นผนังด้านนี้จะมีการหดตัวมากกว่าด้านตรงข้าม ทำให้ผนังคอนกรีตเกิดการโก่งงอ

3.2.2. ความเค้น (Stress)

จากตารางที่ 3 แสดงค่าความเค้น (Stress) ภายในผนังคอนกรีตซึ่งเกิดจากแรงดึง (Tension) และแรงอัด (Compression) ในแนวนอน (Horizontal) และในแนวตั้ง (Vertical) ของด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงและด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิ ซึ่งค่าความเค้นในแนวนอนของด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงมีค่าแรงอัดสูงสุดประมาณ 355 เมกะปาสคาล และด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงมีค่าแรงอัดสูงสุดประมาณ 35 เมกะปาสคาล และค่าแรงดึงสูงสุดที่ตำแหน่ง 2(H) มีค่าประมาณ 27 เมกะปาสคาล และค่าความเค้นในแนวตั้งของด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิ พบว่ามีค่าแรงอัดสูงสุดประมาณ 153 เมกะปาสคาล และค่าแรงดึงสูงสุดที่ตำแหน่ง 2(V) มีค่าประมาณ 26 เมกะปาสคาลและค่าความเค้นของด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิ พบว่ามีค่าแรงอัดสูงสุดประมาณ 33 เมกะปาสคาล และค่าแรงดึงสูงสุดมีค่าประมาณ 3 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 3 ค่าความเค้น (Stress) ของผนังคอนกรีตที่มีอุณหภูมิของผนังคอนกรีต

ตำแหน่ง	ค่าความเครียด (Strain) ($x10^{-3}$)	
	ด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ	ด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ
1(H)	-10.699	-0.421
2(H)	-11.798	3.198
3(H)	-10.404	-0.768
4(H)	-12.837	-2.573
5(H)	-14.260	-2.633
1(V)	1.361	-1.240
2(V)	2.566	-0.675
3(V)	1.394	-1.515
4(V)	-2.369	2.359
5(V)	-2.528	3.471

จากผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น (Stress) ในแนวนอน (Horizontal) ของผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงจะมีค่าแรงอัดที่เกินกว่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต เช่นเดียวกับแนวตั้ง (Vertical) ดังนั้นผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดรอยร้าวขึ้น แต่สำหรับด้านตรงข้ามนั้นค่าแรงอัดมีค่าน้อยกว่าจึงทำให้มีความเสี่ยงต่ำต่อการเกิดรอยร้าวเนื่องจากความสามารถในการรับแรงอัดนั้นเพียงพอ แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังรับแรงดึงพบว่าที่ผิวด้านที่ไม่ได้สัมผัสกับอุณหภูมิสูงในแนวนอนนั้นมีค่าแรงดึงที่เกินกว่า 10% ของกำลังรับแรงอัด (ประมาณ 4 เมกะปาสาคาล) ดังนั้นจึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดรอยร้าวขึ้นได้ กล่าวคือถึงแม้ผนังด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิโดยตรงแม้จะมีอุณหภูมิที่ปรากฏต่ำกว่าประมาณ 250 องศาเซลเซียส แต่ก็มีโอกาสที่จะเกิดรอยร้าวเนื่องจากกำลังรับแรงดึงที่ไม่เพียงพอ แต่บางตำแหน่งของด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิมีค่าแรงดึงประมาณ 3 เมกะปาสคาล ซึ่งน้อยกว่า 10% ของกำลังรับแรงอัด (ประมาณ 4 เมกะปาสคาล) ดังนั้นจึงมีบางบริเวณที่มีโอกาสที่จะไม่เกิดรอยร้าวตามผนังคอนกรีตได้ และผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงอยู่ภายใต้ความร้อนสูง ทำให้ค่าความเค้นนั้นมีค่ามากกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีต อย่างไรก็ดีทางคณะผู้จัดทำจะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

3.3 ผลการวิเคราะห์ผนังภายใต้อุณหภูมิสูงและมีแรงกระทำ

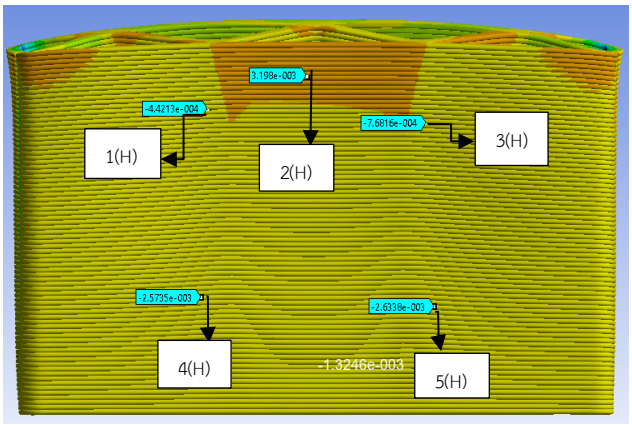
จากนั้นจึงทำการศึกษาเพิ่มเติมจากแบบจำลองผนังคอนกรีต โดยเป็นผนังคอนกรีตที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงและมีแรงกระทำด้วย เพื่อวิเคราะห์เพิ่มเติมและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างทั้ง 2 กรณี โดยทำการสุ่มเลือกมา 5 ตำแหน่งดังรูปที่ 5 และแสดงค่าค่าความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ของผนังคอนกรีตที่มีอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำของดังตารางที่ 4

3.3.1. ความเครียด (Strain)

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเครียด (Strain) ในแนวนอน (Horizontal) และในแนวตั้ง (Vertical) โดยค่าความเครียดจากการวิเคราะห์ผลในชุดโปรแกรมคำสั่ง Ansys ในแนวนอนของผนังคอนกรีตด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำอยู่ในช่วงประมาณ -7.139×10^{-3} ถึง 11.944×10^{-3} ส่วนด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำอยู่ในช่วงประมาณ -26.224×10^{-3} ถึง 21.486×10^{-3} และค่าความเครียดในแนวตั้งของผนังคอนกรีตด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำอยู่ในช่วงประมาณ -3.030×10^{-3} ถึง 12.009×10^{-3} ส่วนด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำอยู่ในช่วงประมาณ -18.160×10^{-3} ถึง 4.533×10^{-3}

ตารางที่ 4 ค่าความเครียด (Strain) ของผนังคอนกรีตที่มีอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำ

ตำแหน่ง	ค่าความเค้น (Stress) (เมกะปาสคาล)	
	ด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง	ด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง
1(H)	-273.010	-35.083
2(H)	-281.120	27.379
3(H)	-256.910	-34.008
4(H)	-354.560	-34.208
5(H)	-333.400	-25.750
1(V)	-48.632	-33.242
2(V)	26.074	-5.621
3(V)	-43.808	-24.603
4(V)	-152.580	2.551
5(V)	-152.240	2.801



รูปที่ 5 สุ่มเลือกค่าต่างๆบนผนังคอนกรีต 5 ตำแหน่ง

จากผลการวิเคราะห์ผลค่าความเครียด (Strain) ในแนวนอน (Horizontal) ของทั้ง 2 ด้านของผนังคอนกรีต ด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงมีค่าความเครียดน้อยกว่าด้านตรงข้าม ยกตัวอย่างเช่น ตำแหน่ง 4(H) จะมีค่าความเครียดน้อยกว่าอยู่ประมาณ 400% เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงกว่าจึงมีการหดตัวในแนวนอนมากกว่าด้านตรงข้าม ส่วนค่าความเครียดในแนวตั้ง (Vertical) ค่าความเครียดของทั้ง 2 ด้านมีทั้งค่าบวกและค่าลบ ดังนั้นกำแพงจะมีทั้งการขยายตัวและหดตัวตามบริเวณต่างๆ โดยเมื่อสังเกตค่า

ความเครียดที่อยู่บริเวณส่วนบน คือตำแหน่งที่ 1(V) 2(V) และ3(V) ของด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ ค่าความเครียดจะมีค่าบวกทำให้ผนังคอนกรีตมีการขยายตัวในแนวตั้ง ยกตัวอย่างเช่นตำแหน่ง 1(V) ที่มีค่าเท่ากับ 1.361 x 10^{-3} ดังนั้นผนังด้านนี้จะมีการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่มากกว่าด้านตรงข้าม ทำให้ผนังคอนกรีตมีลักษณะโก่งงอ เช่นเดียวกับในกรณีที่ไม่มีแรงกระทำ

3.2.2. ความเค้น (Stress)

ตารางที่ 5 ค่าความเค้น (Stress) ของผนังคอนกรีตที่มีอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำ

ตำแหน่ง	ค่าความเค้น (Stress) (เมกะปาสคาล)	
	ด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ	ด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ
1(H)	-277.900	-37.973
2(H)	-269.460	41.726
3(H)	-277.120	-38.308
4(H)	-360.700	-36.619
5(H)	-336.170	-26.848
1(V)	-52.156	-38.997
2(V)	25.198	-6.287
3(V)	-51.772	-25.363
4(V)	-159.800	4.862
5(V)	-150.820	3.277

ตารางที่ 5 แสดงค่าความเค้น (Stress) ภายในผนังคอนกรีตซึ่งเกิดจากแรงดึง (Tension) และแรงอัด (Compression) ในแนวตั้ง (Vertical) และในแนวนอน (Horizontal) ของด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำและด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ ซึ่งค่าความเค้นในแนวนอนของด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำมีค่าแรงอัดสูงสุดประมาณ 360 เมกะปาสคาล และด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำมีค่าแรงอัดสูงสุดประมาณ 38 เมกะปาสคาล และค่าแรงดึงสูงสุดที่ตำแหน่ง 2(H) มีค่าประมาณ 41 เมกะปาสคาล และค่าความเค้นในแนวตั้งของด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำมีค่าแรงอัดสูงสุดประมาณ 160 เมกะปาสคาล และค่าแรงดึงสูงสุดที่ตำแหน่ง 2(V) มีค่าประมาณ 25 เมกะปาสคาล ส่วนด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิ พบว่ามีค่าแรงอัดสูงสุดประมาณ 39 เมกะปาสคาล และค่าแรงดึงสูงสุดมีค่าประมาณ 5 เมกะปาสคาล

จากผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น (Stress) ในแนวนอน (Horizontal) ของผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำจะมีค่าแรงอัดที่เกินกว่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต เช่นเดียวกับในแนวตั้ง (Vertical) ดังนั้นผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดรอยร้าวขึ้น แต่สำหรับด้านตรงข้ามนั้นค่าแรงอัดมีค่าน้อยกว่าจึงทำให้มีความเสี่ยงต่ำต่อการเกิดรอยร้าวเนื่องจากความสามารถในการรับแรงอัดนั้นเพียงพอ แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังรับแรงดึงพบว่าที่ผิวด้านที่ไม่ได้สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำในแนวนอนนั้นมีค่าแรงดึงสูงสุดประมาณ 41 เมกะปาสคาล และในแนวตั้งมีค่าแรงดึงสูงสุดประมาณ 5 เมกะปาสคาล ซึ่งเกินกว่า 10% ของกำลังรับแรงอัด (ประมาณ 4 เมกะปาสคาล) ดังนั้นจึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดรอยร้าวขึ้นได้ กล่าวคือถึงแม้ผนังด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิโดยตรงแม้จะมีอุณหภูมิที่ปรากฏต่ำกว่าประมาณ 250 องศาเซลเซียส แต่ก็มีโอกาสที่จะเกิดรอยร้าวเนื่องจากกำลังรับแรงดึงที่ไม่พียงพอ

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความเครียด (strain) ของผนังคอนกรีตด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงกับผนังคอนกรีตด้านไม่ที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำของผนังคอนกรีต

ตำแหน่ง	ค่าความเครียด (Strain) (x10^{-3})		ความแตกต่างของค่าความเครียดของทั้ง 2 กรณี (ร้อยละ)
	ด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิ	ด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำ	
1(V)	-1.211	-1.240	2.395
2(V)	-0.699	-0.675	3.433
3(V)	-1.572	-1.515	3.656
4(V)	2.627	2.359	10.202
5(V)	3.556	3.471	2.390
1(H)	-0.3004	-0.4213	40.256
2(H)	3.1441	3.1980	1.714
3(H)	-0.7213	-0.7681	6.488
4(H)	-2.5269	-2.5735	1.844
5(H)	-2.6335	-2.6338	0.011

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความเครียด (strain) ของผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงกับผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำของผนังคอนกรีต

ตำแหน่ง	ค่าความเครียด (Strain) (x10^{-3})		ความแตกต่างของค่าความเครียดของทั้ง 2 กรณี (ร้อยละ)
	ด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง	ด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ	
1(V)	1.370	1.361	0.657
2(V)	2.448	2.566	4.820
3(V)	1.343	1.394	3.797
4(V)	-2.304	-2.369	2.821
5(V)	-2.437	-2.528	3.734
1(H)	-10.482	-10.699	2.070
2(H)	-10.843	-11.798	8.808
3(H)	-10.707	-10.404	2.830
4(H)	-13.903	-12.837	7.667
5(H)	-15.107	-14.260	5.607

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความเครียด (strain) ของผนังคอนกรีตทั้งสองกรณีนั้น เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความเครียดของด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงกับด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำที่มากที่สุดมีค่าประมาณร้อยละ 40 ซึ่งในตำแหน่งอื่นจะมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ส่วนความแตกต่างของค่าความเครียดของด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงกับด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ จะมีค่าไม่เกินร้อยละ 9 ดังในตารางที่ 7 ซึ่งในกรณีที่มีแรงกระทำจะมีค่าความเครียดที่มากกว่าผนังคอนกรีตที่ไม่มีแรงกระทำ จึงทำให้ผนังคอนกรีตที่มีแรงกระทำมีการหดตัวและเสียรูปมากกว่าผนังคอนกรีตที่ไม่มีแรงกระทำ

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความเค้น (Stress) ของผนังคอนกรีตด้านไม่ที่สัมผัสอุณหภูมิสูงกับผนังคอนกรีตด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำของผนังคอนกรีต

ตำแหน่ง	ค่าความเค้น (Stress) (เมกะปาสคาล)		ความแตกต่างของค่าความเค้นของทั้ง 2 กรณี (ร้อยละ)
	ด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิ	ด้านที่สัมผัสไม่กับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ	
1(V)	-33.242	-38.997	17.312
2(V)	-5.621	-6.287	11.848
3(V)	-24.603	-25.363	3.089
4(V)	2.551	4.862	90.592
5(V)	2.801	3.277	16.994
1(H)	-35.083	-37.973	8.238
2(H)	27.379	41.726	52.401
3(H)	-34.008	-38.308	12.644
4(H)	-34.208	-36.619	7.048
5(H)	-25.750	-26.848	4.264

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความเค้น (Stress) ของผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงกับผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ

ตำแหน่ง	ค่าความเค้น (Stress) (เมกะปาสคาล)		ความแตกต่างของค่าความเค้นของทั้ง 2 กรณี (ร้อยละ)
	ด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง	ด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ	
1(V)	-48.632	-52.156	7.246
2(V)	26.074	25.198	3.360
3(V)	-43.808	-51.772	18.179
4(V)	-152.580	-159.800	4.732
5(V)	-152.240	-150.820	0.933
1(H)	-273.010	-277.900	1.757
2(H)	-281.120	-269.460	4.148
3(H)	-256.910	-277.120	7.867
4(H)	-354.560	-360.700	4.381
5(H)	-333.400	-336.170	0.831

จากตารางที่ 8 และ 9 พบว่า การเปรียบเทียบค่าความเค้น (Stress) ของผนังคอนกรีตที่มีอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำและไม่มีแรงกระทำในแนวดิ่งนั้น เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างค่าความเค้นของด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงกับด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำมีค่าความแตกต่างของค่าความเค้นใกล้เคียงกัน แต่ในกรณีที่มีแรงกระทำจะมีค่าความเค้นมากกว่าในแต่ละบริเวณ เนื่องจากได้รับแรงกระทำในแนวดิ่ง ทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดรอยร้าวได้มากกว่าในกรณีที่ไม่มีแรงกระทำ ยกตัวอย่างเช่น ตำแหน่งที่ 4(V) มีค่าความแตกต่างของค่าความเค้นที่มากที่สุดประมาณร้อยละ 90 ส่วนความแตกต่างของค่าความเค้นของด้านที่สัมผัสอุณหภูมิสูงกับด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำ จะมีค่าไม่เกินร้อยละ 18 ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของผนังคอนกรีตที่สัมผัสอุณหภูมิสูงภายใต้แรงกระทำจะมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดรอยแตกร้าวมากกว่าผนังคอนกรีตที่ไม่มีแรงกระทำ

4. บทสรุป

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองผนังคอนกรีต สรุปได้ดังนี้

1) จากผลการวิเคราะห์ค่าความเครียด (Strain) ของผนังคอนกรีตด้านที่ไม่สัมผัสอุณหภูมิสูงจะมีค่าน้อยกว่าด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงทำให้มีการหดตัวในแนวตั้งมากกว่าด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงจึงทำให้ลักษณะผนังคอนกรีตจะมีการโก่งงอ

2) จากผลการวิเคราะห์ค่าความเค้น (Stress) ทำให้ทราบถึงความสามารถจากการต้านทานแรงดึงของคอนกรีต เมื่อมีค่าความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตมากกว่าประมาณ 4 เมกะปาสคาล และค่าความต้านทานแรงอัดมากกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าประมาณ 40 เมกะปาสคาล จะทำให้ผนังคอนกรีตที่บริเวณนั้นเกิดรอยร้าว ซึ่งผนังคอนกรีตด้านที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงมีความเสี่ยงที่จะเกิดรอยแตกร้าวที่ผนังคอนกรีตมากกว่าด้านที่ไม่สัมผัสกับอุณหภูมิทั้งในกรณีที่มีแรงกระทำและไม่มีแรงกระทำในแนวดิ่ง

3) ความแตกต่างของค่าความเค้นและค่าความเครียดนั้นมีค่าความแตกต่างที่ไม่ต่างกันมากนัก อาจมีบางตำแหน่งที่ไม่ใกล้เคียง เนื่องจากค่าความเค้นและค่าความเครียดของผนังคอนกรีตที่มีอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวมีค่าน้อยกว่าผนังคอนกรีตที่มีอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำในแนวดิ่งนั้นมีค่าความเครียด จึงทำให้บางตำแหน่งมีค่าความแตกต่างที่มาก กล่าวคือ ทำให้ผนังคอนกรีตที่มีแรงกระทำเกิดการหดตัวและมีโอกาสเกิดรอยแตกร้าวตามผนังคอนกรีตได้มากกว่าผนังคอนกรีตที่ไม่มีแรงกระทำ

4) ผนังคอนกรีต 3 มิติ สามารถทนความร้อนได้ที่อุณหภูมิสูง แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Totsawat Daungwilailuk, Phoonsak Pheinsusom, Withit Pansuk. (2021). *Uniaxial load testing of large- scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis* (วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

[2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2007). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.* กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6

[3] The European Union EDIT OF GOVERNMENT. (2002). EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG.

[4] วิชา สุธาสิส (2004). การทดสอบวัสดุทางวิศวกรรมโยธา Materials Testing in Civil Engineering. สืบค้น 16 มกราคม 2022, สืบค้นจาก https://engfanatic.tumcivil.com/tumcivil_1/media/Somsak-LAB/materialsheetfull.pdf

[5] สุชาติ กิจพิทักษ์. (2009). *การทดสอบวัสดุ*. สืบค้น 16 มกราคม 2022, สืบค้นจาก http://pimporn.nsdv.go.th/pr/text2010/suchattext2010.pdf

[6] ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการทดสอบวัสดุ. (2019). สืบค้น 16 มกราคม 2022 สืบค้นจาก https://www.tonanasia.com/destructive-nondestructive-testing/

[7] ศิลา วงศ์เจริญ. (2020). *เครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใหญ่ที่สุดของยุโรปสร้างบ้าน 2 ชั้นหลังแรกเสร็จแล้วใช้เวลา 15 วัน*. สืบค้น 23 พฤษภาคม 2022 สืบค้น https://www.beartai.com/brief/sci-news/467405

[8] *การพิมพ์ 3 มิติแบบก่อสร้างประวัติศาสตร์และการออกแบบ.* สืบค้น 23 พฤษภาคม 2022 สืบค้นจาก https://hmong.in.th/wiki/Construction_3D_printing

[9] Sync Innovation, (2019), Home building 3d Printer. Retrieved 23 May 2022, from https://bit.ly/3NZngLc