



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการทนไฟของแผ่นพื้นคอมโพสิตรูปแบบหน้าตัดต่างกัน ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

Comparative study on fire resistance performance of composite slabs with different cross-sections using finite element analysis

วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์ ไชยวัฒน์ เจนจบ ประพทุทธิ์ ชาวมูล สมชาย พุทธาสมศรี กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Wiwat Puatatsananon Chaiwat Jenjob Praphuet Chawmoon Somchai Phutthasomsri
Kittisak Kuntiyawichai*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190

* Corresponding author.

E-mail: kittisak.k@ubu.ac.th; Telephone: 0865658228

วันที่รับบทความ 2 กรกฎาคม 2569; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 18 สิงหาคม 2569; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 2 กันยายน 2569

วันที่ตอบรับบทความ 7 กันยายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมแผ่นพื้นคอมโพสิตกรณีถูกเพลิงไหม้โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ANSYS สร้างแบบจำลองสามมิติร่วมระหว่างความร้อนและโครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น ผลการสอบเทียบอุณหภูมิกับผลการทดสอบอ้างอิงมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยไม่เกิน ร้อยละ 3.5 และมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 12.7 องศาเซลเซียส ซึ่งยืนยันความแม่นยำของแบบจำลอง รูปทรงหน้าตัดของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ รูปทรงหน้าตัด Trapezoidal และรูปทรงหน้าตัด Re-entrant ส่วนพฤติกรรมแผ่นพื้นคอมโพสิตจะรายงานผลในพจน์ของการกระจายอุณหภูมิ กำลังรับน้ำหนักคงเหลือ และความเป็นฉนวน การจำลองสภาวะเพลิงไหม้จะใช้อุณหภูมิตามมาตรฐาน ISO 834 ซึ่งเป็นอุณหภูมิมาตรฐานสากลที่กำหนดขึ้นเพื่อจำลองการเกิดเพลิงไหม้ในอาคาร จากผลการศึกษา พบว่า เมื่อแผ่นพื้นคอมโพสิตถูกเพลิงไหม้เป็นระยะเวลา 50 นาที อุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal นอกจากนี้ยังทำให้ทราบว่า แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant มีความต้านทานความร้อนได้ดีกว่าแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักคงเหลือหลังการเกิดเพลิงไหม้ พบว่า แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant และ แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal มีกำลังรับน้ำหนักคงเหลือ ร้อยละ 36.59 และ 33.48 ตามลำดับ เมื่อประเมินตามเกณฑ์ความเป็นฉนวนกันความร้อน (Insulation criterion) ตามมาตรฐาน ISO 834 พบว่ารูปทรงหน้าตัด Trapezoidal และ Re-entrant สามารถรักษาความเป็นฉนวนได้นาน 70 นาที และ 100 นาที ตามลำดับ จากผลการศึกษาจึงกล่าวได้ว่า รูปทรงหน้าตัดของแผ่นพื้นคอมโพสิตมีผลต่อความสามารถในการทนไฟของแผ่นพื้น และการเลือกใช้แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัดที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มความปลอดภัยของโครงสร้างอาคารภายใต้สภาวะเพลิงไหม้

คำสำคัญ

การทนไฟ แผ่นพื้นคอมโพสิต แผ่นเหล็กขึ้นรูป การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ กำลังรับน้ำหนักคงเหลือ

Abstract

The objective of this research is to investigate the behavior of composite slabs under fire conditions using finite element analysis. Firstly, the numerical analysis employed a 3D non-linear coupled thermal-structural ANSYS model. Thermal validation against reference test results yielded a mean relative error below 3.5% and a maximum temperature discrepancy within 12.7 °C, verifying the model's accuracy. This study investigated the effects of cross-sectional shape on the temperature distribution, load-bearing capacity, and thermal insulation of composite slabs exposed to fire. Two profile types, trapezoidal and re-entrant, were analyzed using the ISO 834 standard fire curve. The results revealed that the re-entrant profile exhibited superior thermal resistance, resulting in lower internal temperatures after 50 minutes of fire exposure. Consequently, the residual load-bearing capacity ratios for the trapezoidal and re-entrant profiles were 33.48% and 36.59%, respectively. Under the ISO 834 thermal insulation criterion, the trapezoidal and re-entrant profiles achieved insulation fire ratings of 70 and 100 minutes, respectively. These findings indicate that cross-sectional geometry significantly influences the fire resistance of composite slabs. Ultimately, selecting an appropriate profile can substantially enhance structural safety under fire conditions.

Keywords

fire resistance; composite slab; profiled steel decking; finite element analysis; residual capacity

1. บทนำ

แผ่นพื้นคอมโพสิต (Composite slabs) เป็นระบบพื้นหล่อที่ใช้แผ่นเหล็กคอมโพสิตขึ้นรูปลอนที่มีปุ่มนูน (Embossment) วางบนโครงสร้างแล้วเทคอนกรีตทับหน้า โดยแผ่นเหล็กจะทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและเหล็กเสริมรับแรงดึงส่วนคอนกรีตรับแรงอัด วัสดุทั้งสองส่วนจึงรวมเป็นชิ้นเดียวกันทำให้แข็งแรงและมีน้ำหนักเบา ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างอาคารช่วงพาดกว้าง (Long-span structures) โรงงานอุตสาหกรรม อาคารพักอาศัยรวม โรงแรม สถานีรถไฟ สะพาน และอาคารโครงสร้างเหล็กหลายชั้น [1] เนื่องจากระบบพื้นชนิดนี้มีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบดั้งเดิม อาทิ อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักมีค่าสูง (High strength-to-weight ratio) ช่วยลดต้นทุน ระยะเวลาในการก่อสร้าง และลดความจำเป็นในการใช้ไม้แบบ [2] อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ (Fire conditions) วัสดุที่เป็นส่วนประกอบของแผ่นพื้นคอมโพสิตจะเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อน ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนัก (Load-bearing capacity) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหากเกิดสภาวะวิบัติ (Failure state) จะนำไปสู่ความสูญเสียทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สิน

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนและทางกลของแผ่นพื้นคอมโพสิตภายใต้สภาวะเพลิงไหม้

ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างเช่น Guo และ Bailey [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ต่าง ๆ พบว่า อัตราการคายความร้อนของแผ่นพื้นคอมโพสิตมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมคงค้าง (Residual behavior) ของโครงสร้าง Nguyen และคณะ [4] ทดสอบแผ่นพื้นคอมโพสิตแบบพื้นเรียบ (Flat web) ที่ฝังชิ้นส่วนเหล็กในคอนกรีต พบว่า คงสมบัติความเป็นฉนวนได้นาน 4 ชั่วโมง เมื่อฝังชิ้นส่วนเหล็กในแผ่นพื้นคอมโพสิตแบบพื้นเรียบ นอกจากนี้ สมฤทัยและคณะ [5] ศึกษาแผ่นพื้นที่มีช่องเปิดภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้างและพบว่า ช่องเปิดมีบทบาทสำคัญในการช่วยระบายความร้อน ส่งผลให้การทรุดตัวของแผ่นพื้นเกิดขึ้นช้ากว่าแผ่นพื้นทึบ อย่างไรก็ตาม การทดสอบเหล่านี้ต่างดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต้องมีการเตรียมการ การดำเนินการและหลังการดำเนินการ ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและใช้ระยะเวลานาน จึงมีการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis; FEA) เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว โปรแกรม FEA เช่น ANSYS และ ABAQUS ซึ่งเป็นโปรแกรมในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย Filho และคณะ [6] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear thermal analysis) ที่มีต่อการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นในช่วงเกิดเพลิงไหม้ และช่วงการคลายความร้อนหรือช่วงการเย็นตัวหลังสภาวะเพลิงไหม้ ในขณะที่ Sundararoban และ Krishnan

[7] นำเสนอการใช้แบบจำลอง Concrete damaged plasticity (CDP) ควบคู่กับการจำลองพฤติกรรมรอยต่อ (Contact interface) ระหว่างเหล็กและคอนกรีต ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น Ribeiro [8] ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประเมินความเป็นฉนวนกันความร้อน (Thermal insulation) โดยพบว่า ช่องว่างอากาศ (Air gap model) ระหว่างแผ่นเหล็กและคอนกรีต อันเกิดจากการหลุดร่อน (Debonding) มีความเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีช่องว่างอากาศ ระหว่างแผ่นเหล็กและคอนกรีตหรือที่เรียกว่าวัสดุสัมผัสกัน อย่างสมบูรณ์ (Perfect contact) Piloto และคณะ [9] ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติเพื่อประเมินเกณฑ์ ความเป็นฉนวนกันความร้อน (Insulation criterion) ของแผ่น พื้นคอมโพสิตภายใต้เพลิงไหม้แบบธรรมชาติ (Natural fire) โดยพบว่า ความเป็นฉนวนอาจเกิดขึ้นในช่วงการคลายความร้อน (Cooling phase) และขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นพื้น นอกจากนี้ Balsa และคณะ [10] ได้พัฒนาแบบจำลองเชิง ตัวเลขวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิในชิ้นส่วนย่อยของ แผ่นพื้น และพบว่าวิธีคำนวณอย่างง่ายตาม Eurocode อาจ ทำนายค่าอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจริง ส่วนพฤติกรรมหลังเพลิงไหม้ Chaudhary และคณะ [11] ได้วิเคราะห์ความน่าจะเป็นของ พฤติกรรมโครงสร้าง และพบว่ากำลังรับน้ำหนักคงเหลือ (Residual capacity) ของแผ่นพื้นคอมโพสิตอาจลดลงเหลือ เพียงร้อยละ 60 ของกำลังเดิมก่อนเกิดเพลิงไหม้ Trinh และ Kohno [12] ทดสอบและจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บน รูปทรงเรขาคณิตของแผ่นพื้น 6 รูปแบบ พบว่าการแยกตัวของ แผ่นเหล็ก (Steel deck detachment) และการส่งผ่านความร้อนบริเวณผิวสัมผัสมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่ออุณหภูมิสะสม Silva และคณะ [13] ใช้แบบจำลอง ANSYS เปรียบเทียบแผ่นพื้น หน้าตัด Trapezoidal และ Re-entrant พบว่าหน้าตัด Re-entrant ให้อัตราการทนไฟที่ยาวนานกว่า

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เน้นศึกษาเฉพาะพฤติกรรมบาง ด้านของแผ่นพื้นคอมโพสิต เช่น การตอบสนองทางความร้อน ผลของเหล็กเสริม คุณสมบัติของคอนกรีต พฤติกรรมบริเวณ รอยต่อระหว่างเหล็กกับคอนกรีตหรือเสถียรภาพของโครงสร้าง ขนาดจริง แม้จะมีบางงานวิจัยที่พิจารณารูปทรงเรขาคณิตของ แผ่นเหล็กขึ้นรูปที่แตกต่างกัน แต่การเปรียบเทียบพฤติกรรม การทนไฟอย่างเป็นระบบระหว่างแผ่นพื้นคอมโพสิตหน้าตัด

Trapezoidal และ Re-entrant ภายใต้เงื่อนไขเชิงตัวเลขและ เงื่อนไขทางความร้อนเดียวกันยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบ

1) การกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งช่วงเพิ่มความร้อนและ ช่วงคลายความร้อน

2) การลดลงของกำลังรับน้ำหนักและกำลังรับน้ำหนักคง เหลือในเชิงปริมาณพร้อมทั้งสร้างกราฟทำนายกำลังรับน้ำหนัก คงเหลือ

3) ประเมินประสิทธิภาพความเป็นฉนวนกันความร้อน ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและ เครื่องมือที่สำคัญสำหรับการประเมินโครงสร้างหลังเหตุ อัคคีภัย (Post-fire structural assessment) ซึ่งจะช่วยให้ วิศวกรสามารถตัดสินใจได้อย่างแม่นยำว่าแผ่นพื้นดังกล่าวยังมี ขีดความสามารถเพียงพอสำหรับการใช้งานต่อไปหรือไม่ หรือ จำเป็นต้องได้รับการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังตามหลัก วิศวกรรม

2. วิธีการศึกษา

2.1 การสอบเทียบแบบจำลอง

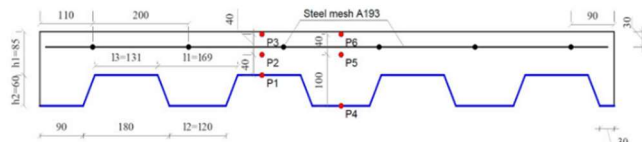
ขั้นตอนแรกของการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอมโพสิตภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อให้แน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือ งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลอง ในโปรแกรม ANSYS โดยอ้างอิงเงื่อนไขสถานการณ์เพลิงไหม้ (Fire scenarios) จากงานวิจัยของ Filho และคณะ [6] ร่วมกับการพิจารณาคุณสมบัติวัสดุที่แปรผันตาม อุณหภูมิ (Temperature-dependent material properties) จากงาน วิจัยของ Fernando Freire Ribeiro [8] เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ในการวิเคราะห์

การทวนสอบแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา (Temperature-time curves) ที่จุดอ้างอิง P4, P5 และ P6 ของแบบจำลอง (ดัง รูปที่ 1) กับผลการทดสอบจากงานวิจัยของ Filho และคณะ [6] ข้อมูลมิติหน้าตัดและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการ ทวนสอบแบบจำลอง ได้แก่ คอนกรีต แผ่นเหล็กขึ้นรูป (Steel deck) และตะแกรงเหล็ก (Wire mesh) สรุปไว้ในตารางที่ 1

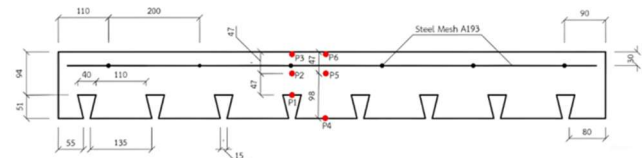
ถึง 4 ตามลำดับ ส่วนรูปแบบการให้ความร้อนนั้นอ้างอิงตาม
เส้นโค้งอุณหภูมิ Fire 3 ดังแสดงในรูปที่ 2

2.2 การวิเคราะห์แบบจำลอง

การศึกษานี้พิจารณาแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด 2 รูปแบบเรขาคณิต ได้แก่ หน้าตัด Trapezoidal และหน้าตัด Re-entrant ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยกำหนดตัวแปรควบคุมคือมิติของแผ่นพื้น (กว้าง 1.2 เมตร ยาว 4 เมตรหนา 0.145 เมตร) ดังรูปที่ 5 และใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในสภาวะการเกิดเพลิงไหม้ในอาคารตามอุณหภูมิมาตรฐานสากล ISO 834 (รูปที่ 6)



รูปที่ 3 มิติของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

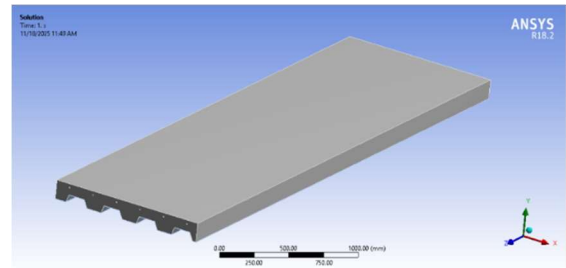


รูปที่ 4 มิติของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

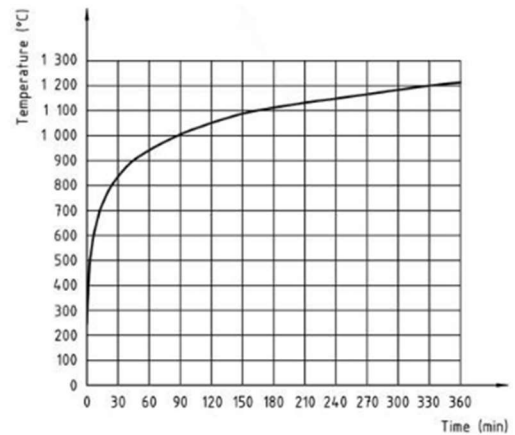
การจำลองทำด้วยโปรแกรม ANSYS v.18.2 [14] แบ่งชนิดเอลิเมนต์เป็น 2 ส่วน: ในการวิเคราะห์ความร้อน ใช้เอลิเมนต์ SOLID278 (3D 8-Node thermal solid) สำหรับคอนกรีตและแผ่นเหล็ก ส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างใช้เอลิเมนต์ SOLID185 (3D 8-Node structural solid) สำหรับคอนกรีต, SHELL181 สำหรับแผ่นเหล็กขึ้นรูป (Steel deck) และ LINK180 (3D Spar element) สำหรับตะแกรงเหล็ก (Wire mesh)

คุณสมบัติทางความร้อน (การนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น) ของคอนกรีตและเหล็กปรับเปลี่ยนตามอุณหภูมิตาม Eurocode 2 (EN 1992-1-2) [15] และ Eurocode 3 (EN 1993-1-2) [16] สำหรับพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตใช้แบบจำลอง Concrete damaged plasticity ที่พิจารณาค่าการเสื่อมสภาพของโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัด ส่วนแผ่นเหล็กและตะแกรงเหล็กใช้แบบจำลอง

Non-linear isotropic hardening ร่วมกับตัวคูณลดกำลังตาม Eurocode 4 (EN 1994-1-2) [17]



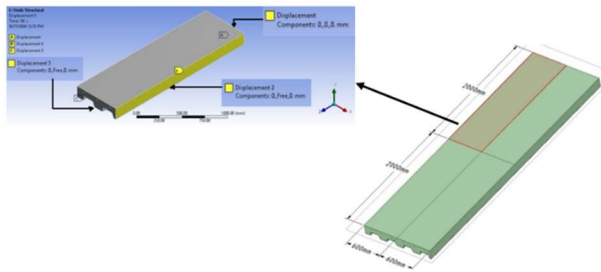
รูปที่ 5 ลักษณะขนาดแบบจำลองแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal ซึ่งสร้างในโปรแกรม ANSYS



รูปที่ 6 Profile ไฟมาตรฐาน ISO 834 [6]

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผล (Computational efficiency) และประหยัดเวลาการคำนวณ (Computational time) เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้ทรัพยากร ดังนั้น แบบจำลองโครงสร้างจึงถูกลดทอนขนาดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ (Quarter-symmetry model) โดยอาศัยหลักการสมมาตรของหน้าตัด (รูปที่ 7) จึงกำหนดเงื่อนไขสมมาตรดังนี้: ที่ระนาบ Y-Z กำหนดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากระนาบ $U_x = 0$ และที่ระนาบ X-Y กำหนดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากระนาบ $U_z = 0$ และ ที่ปลายแผ่นพื้น ล็อกการเคลื่อนตัว $U_x = U_y = U_z = 0$ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตความร้อนตามมาตรฐาน Eurocode [15-17]: ผิวด้านล่างที่สัมผัสไฟกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน $\alpha_c = 25$ วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียส ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) และ

ค่าการแผ่รังสีของผิววัสดุ (Emissivity) $\epsilon_m = 0.7$ สำหรับผิวด้านบนที่ไม่สัมผัสไฟ กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน $\alpha_c = 9$ วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียส ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$) และค่า $\epsilon_m = 0.8$ ที่อุณหภูมิแวดล้อมเริ่มต้น $T_0 = 20$ องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 แบบจำลองสมมาตรหนึ่งในสี่ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal

การถ่ายเทความร้อนระหว่างแผ่นหลักและคอนกรีตใช้แบบจำลอง Thermal contact conductance ($h_c = 200$ วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียส ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)) ด้านพฤติกรรมทางกล ใช้คู่ผิวสัมผัส CONTA174 และ TARGE170 กำหนดพฤติกรรมแรงเสียดทานแบบ Penalty method มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน $\mu = 0.3$

การวิเคราะห์พฤติกรรมของแผ่นพื้นคอมโพสิตภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่:

1) การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution analysis) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายและการสะสมความร้อนภายในแผ่นพื้นคอมโพสิตทั้งสองรูปทรงหน้าตัด ผ่านจุดสังเกต P1 ถึง P6 (รูปที่ 3 และ 4) และเพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน การเสื่อมสภาพของวัสดุระหว่างการเกิดเพลิงไหม้

2) การประเมินกำลังรับน้ำหนัก (Load-Bearing capacity assessment) เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของแผ่นพื้นคอมโพสิตทั้งในสภาวะก่อนและหลังได้รับความร้อน โดยจำลองการกระทำของน้ำหนักบรรทุกแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ (Uniformly distributed load: UDL) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างเข้าสู่สภาวะวิบัติ (Failure state)

3) การประเมินความเป็นฉนวนความร้อน (Thermal insulation assessment) เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมความเป็นฉนวนความร้อน โดยกำหนดจุดวัดอุณหภูมิ S1 ถึง S9 บนผิวน้ำของแผ่นพื้นคอมโพสิตด้านที่ไม่สัมผัสเพลิง (Unexposed surface) และประเมินความเสี่ยงในการลุกลามของอัคคีภัย จุดวัดอุณหภูมิ S1 ถึง S9 บนแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal และ แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant แสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

2.3 เกณฑ์การประเมินสภาวะวิบัติและพฤติกรรมหลังเพลิงไหม้ (Evaluation criteria)

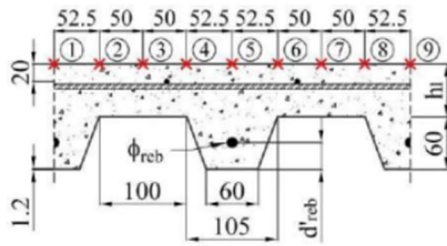
การประเมินพฤติกรรมของแผ่นพื้นคอมโพสิตอ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐานดังต่อไปนี้:

1) สภาวะวิบัติทางโครงสร้าง (Structural failure criterion):

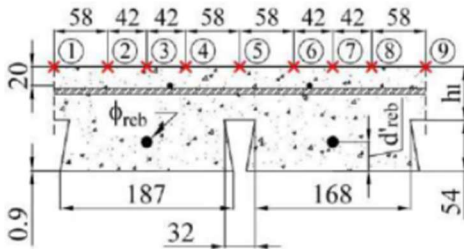
จากการวิเคราะห์พฤติกรรมความเค้น (Stress behavior) ของวัสดุองค์ประกอบ พบว่า ตะแกรงเหล็ก (Wire mesh) เป็นชิ้นส่วนที่เกิดความเค้นสูงสุดก่อนที่จะแผ่นพื้นคอมโพสิตจะเกิดการวิบัติ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้สภาวะวิบัติของแผ่นพื้นคอมโพสิตเกิดขึ้นเมื่อความเค้นในตะแกรงเหล็กถึงจุดคราก (Yield stress) ที่ 650 เมกะปาสกาล (MPa) ระดับน้ำหนักบรรทุก หรือ ระยะโก่งตัวสูงสุด $D_{limit} = L^2/400d$ (หน่วยมิลลิเมตร และ d คือความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด) [15] ขึ้นอยู่กับว่าค่าใดจะถึงก่อน ณ จุดนี้จะถูกบันทึกเป็น "กำลังรับน้ำหนักสูงสุด" ของแผ่นพื้นคอมโพสิต [18]

2) เกณฑ์ความเป็นฉนวน (Insulation criteria):

เกณฑ์ประเมินความเป็นฉนวน ที่จุดวัด S1 ถึง S9 (รูปที่ 8 และ 9) โดยโครงสร้างจะสูญเสียความเป็นฉนวนเมื่อเกิดเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งดังต่อไปนี้ 1) อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ไม่สัมผัสเพลิง เพิ่มขึ้นเกิน $140^\circ C$ จากอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสูงสุด ณ จุดใดจุดหนึ่งบนพื้นผิวที่ไม่สัมผัสเพลิง เพิ่มขึ้นเกิน $180^\circ C$ จากอุณหภูมิเริ่มต้น และ 2) อุณหภูมิสูงสุด ณ จุดใดจุดหนึ่ง ของจุดวัด S1–S9 บนพื้นผิวที่ไม่สัมผัสเพลิง เพิ่มขึ้นเกิน $180^\circ C$ จากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเริ่มต้น



รูปที่ 8 จุดวัด S1-S9 ในการประเมินความเป็นฉนวนของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal [10]



รูปที่ 9 จุดวัด S1-S9 ในการประเมินความเป็นฉนวนของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant [10]

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบแบบจำลอง (Model validation results)

การศึกษาเริ่มจากการวิเคราะห์ Mesh sensitivity analysis โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิสูงสุด (Peak temperature) จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดของ Mesh 3 ขนาด รายละเอียดแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 รายละเอียด Mesh ที่ใช้ในการทดสอบ Mesh sensitivity analysis

ระดับความละเอียดของ Mesh	จำนวนโหนด (Nodes)	จำนวนเอลิเมนต์ (Elements)
Coarse mesh	314,235	194,719
Intermediate mesh	404,505	239,825
Fine mesh	595,613	346,396

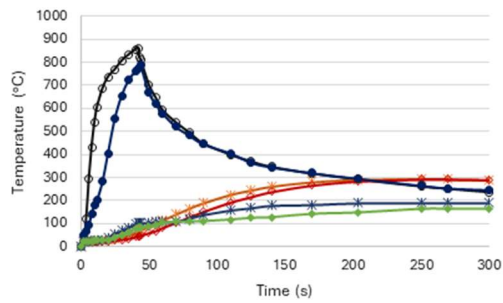
ผลการวิเคราะห์ Mesh sensitivity analysis แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ Mesh sensitivity analysis

ตำแหน่งจุดวัด	ผลต่าง FEA ระหว่าง Coarse กับ Intermediate	ผลต่าง FEA ระหว่าง Intermediate กับ Fine	ความแตกต่าง (%)	เวลาในการคำนวณ (Computation time)
P4 (Steel deck bottom)	9.84 °C	1.73 °C	0.20 %	1 ชม. 05 นาที 39 วินาที
P5 (Mid-concrete)	9.72 °C	1.22 °C	0.42 %	2 ชม. 13 นาที 45 วินาที
P6 (Top concrete)	9.95 °C	0.52 °C	0.18 %	2 ชม. 55 นาที 34 วินาที

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า เมื่อปรับเพิ่มความละเอียดของ Mesh จาก Coarse mesh เป็น Intermediate mesh ค่าอุณหภูมิสูงสุดมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 9.72 องศาเซลเซียส ถึง 9.95 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความละเอียดจาก Intermediate mesh เป็น Fine mesh ค่าอุณหภูมิสูงสุดมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.52 องศาเซลเซียส ถึง 1.73 องศาเซลเซียส (คิดเป็นความเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.42 %) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคำตอบจากแบบจำลองเกิดการลู่เข้า (Mesh convergence) และมีความเป็นอิสระจากขนาดของ mesh (Mesh independent) แล้วตั้งแต่ระดับ Intermediate mesh นอกจากนี้ การใช้ Intermediate mesh ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของอุณหภูมิสูงสุดบริเวณ Steel deck (P4) อยู่ที่ 9.49 % ซึ่งใกล้เคียงกับ Fine mesh (9.27 %) แต่ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าประมาณ 31.3 % (2 ชั่วโมง 13 นาที เปรียบเทียบกับ 2 ชั่วโมง 55 นาที) ดังนั้น Intermediate mesh จึงถูกเลือกเป็นแบบจำลองหลักในการศึกษาวิจัยนี้เพื่อความแม่นยำและประสิทธิภาพในการคำนวณ

หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิโดยใช้ Intermediate mesh model พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (Mean relative error) ระหว่างผลคำนวณ FEA และผลการทดสอบเท่ากับร้อยละ 2.48 โดยมีความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 12.7 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 10 และตารางที่ 7



รูปที่ 10 ผลการทวนสอบแบบจำลอง: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา โดยเทียบกับงานวิจัยของ Filho และคณะ [6]

ตารางที่ 7 ผลการทวนสอบแบบจำลอง: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา โดยเทียบกับงานวิจัยของ Filho และคณะ [6]

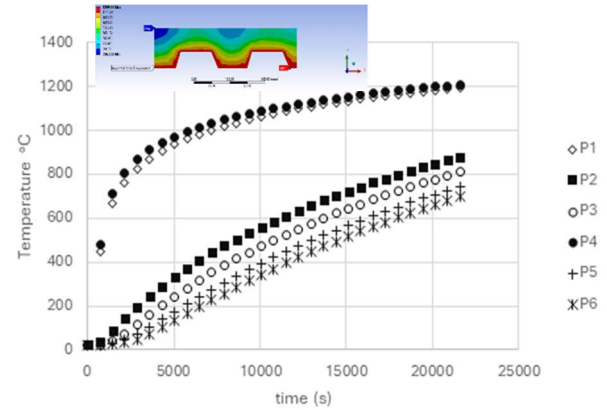
ตำแหน่งจุดวัด	อุณหภูมิสูงสุดจากการทดลอง (°C) [6]	อุณหภูมิสูงสุดจาก FEA (°C)	ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (°C)	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%)
P4 (Steel deck bottom)	865.0	852.3	12.7	1.47%
P5 (Mid-concrete)	382.0	391.5	9.5	2.49%
P6 (Top concrete)	195.0	188.2	6.8	3.49%

ผลลัพธ์ดังกล่าวเป็นการยืนยันถึงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่สร้างขึ้นผ่านโปรแกรม ANSYS ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงใช้แบบจำลองที่ผ่านการทวนสอบแล้วในขั้นตอนการวิเคราะห์หลักในลำดับถัดไป ซึ่งจะดำเนินการจำลองสภาวะเพลิงไหม้ตามเส้นโค้งอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิ และประเมินกำลังรับน้ำหนักคงเหลือของแผ่นพื้นคอมโพสิตทั้งสองรูปแบบหน้าตัดต่อไป

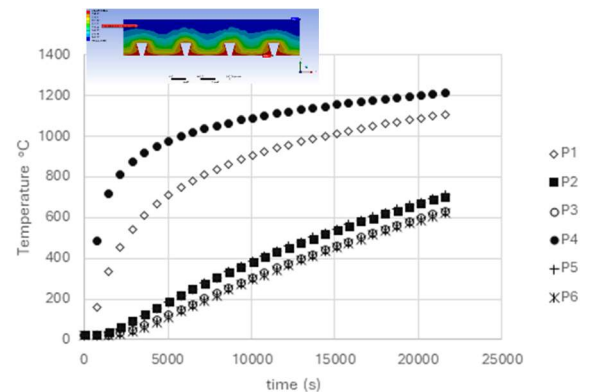
3.2 การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของแผ่นพื้นคอมโพสิต

การศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นคอมโพสิตด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS ภายใต้การจำลองสภาวะเพลิงไหม้ตามเส้นโค้งอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ได้ถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์

ระหว่างอุณหภูมิและเวลา (Temperature-time curves) โดยทำการตรวจวัด ณ ตำแหน่งอ้างอิง P1 ถึง P6 ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal และ แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง P1-P6 ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal กับเวลาในการเกิดเพลิงไหม้



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง P1-P6 ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant กับเวลาในการเกิดเพลิงไหม้

จากรูปที่ 11 และ 12 พบว่า อุณหภูมิที่จุด P4 ของทั้งแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal และ แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant มีค่าสูงสุด รองลงมาคืออุณหภูมิที่จุด P1 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตำแหน่งทั้งสองตั้งอยู่บริเวณแผ่นเหล็กชั้นรูป (Steel deck) ที่สัมผัสกับแหล่งกำเนิดความร้อนโดยตรง ประกอบกับเหล็กมีคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ที่เอื้อต่อการถ่ายเทความร้อน โดยมี

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) สูงถึง 45 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม วัสดุเหล็กมีข้อได้เปรียบในด้านการฟื้นตัวของกำลัง (Strength recovery) ที่ดีเยี่ยมเมื่ออุณหภูมิลดลงเข้าสู่ช่วงทำความเย็น

อุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง P2, P3, P5 และ P6 ซึ่งอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตของแผ่นพื้นคอมโพสิตทั้ง 2 รูปทรงหน้าตัด มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าตำแหน่ง P1 และ P4 อย่างเห็นได้ชัดถึงแม้ว่าเหล็กจะมีค่าการนำความร้อนสูง รูปทรงหน้าตัดของแผ่นเหล็กขึ้นรูปทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางและกระจายความร้อนในแนวระนาบ และส่วนลอนเหล็กช่วยบดบังเปลวไฟไม่ให้สัมผัสเนื้อคอนกรีตส่วนบนโดยตรง ซึ่งช่วยชะลออัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แกนกลางคอนกรีตตามความหนา

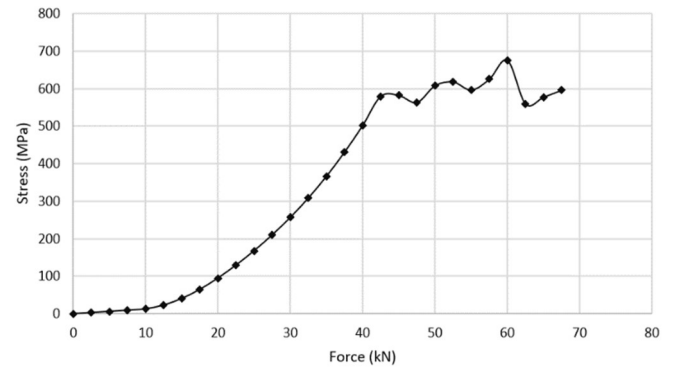
3.3 ความสามารถในการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นคอมโพสิต

1) แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal

1.1) กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของแผ่นพื้นคอมโพสิตก่อนได้รับความร้อน

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลของแผ่นพื้นรหัส Slab C2 จากงานวิจัยของ Guo และ Bailey [3] เป็นกรณีศึกษาอ้างอิงสำหรับสภาวะอุณหภูมิห้อง (Ambient temperature) หรือสภาวะก่อนได้รับความร้อน เพื่อใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้น

จากผลการทดสอบทางห้องปฏิบัติการของ Guo และ Bailey [3] พบว่าแผ่นพื้น Slab C2 ขนาดเต็ม มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 270 กิโลนิวตัน เนื่องจากแผ่นพื้นคอมโพสิตมีความสมมาตรทางเรขาคณิตและการรับแรง จึงใช้แบบจำลองเพียงหนึ่งในสี่ของแผ่นพื้น (Quarter model) เพื่อลดเวลาและทรัพยากรในการคำนวณ โดยกำหนด แรงดันสม่ำเสมอ (Uniform pressure) ในแบบจำลองหนึ่งในสี่ให้มีความเท่ากับแบบจำลองแผ่นพื้นเต็ม ดังนั้น แรงลัพธ์รวมที่กระทำต่อแบบจำลองหนึ่งในสี่จึงมีค่าเท่ากับหนึ่งในสี่ของแรงลัพธ์ของแผ่นพื้นเต็ม ดังนั้น สัดส่วนของกำลังรับน้ำหนักที่ร้อยละ 25 หรือ 67.5 กิโลนิวตัน จึงถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์เทียบวัด ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS แสดงในรูปที่ 13

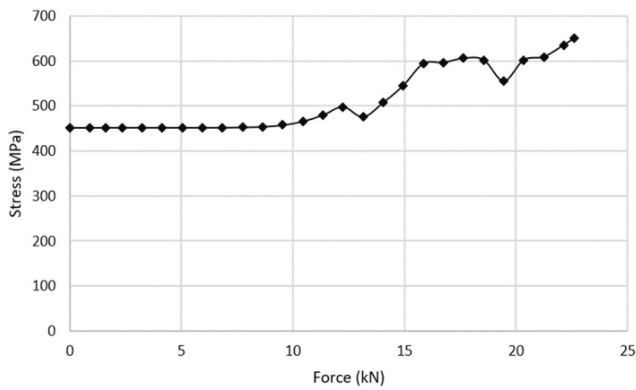


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเค้น (Load-Stress curve) ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal ก่อนได้รับความร้อน

รูปที่ 13 บ่งชี้ว่าสภาวะวิบัติของโครงสร้างเกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนตะแกรงเหล็ก (Wire mesh) ซึ่งเป็นวัสดุที่รับความเค้นสูงสุดถึงจุดคราก โดยแบบจำลองแสดงค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุด ณ จุดวิบัติที่ 67.5 กิโลนิวตัน ซึ่งสอดคล้องและเทียบเท่ากับร้อยละ 25 ของกำลังรับน้ำหนักจากผลการทดสอบจริง [3]

1.2) กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของแผ่นพื้นคอมโพสิตหลังได้รับความร้อน

ผลการจำลองสภาวะเพลิงไหม้ตามเส้นโค้งอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 พบว่าแผ่นพื้นคอมโพสิตได้รับความร้อนอุณหภูมิสูงถึง 918 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 50 นาที ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง ANSYS (รูปที่ 14) แสดงให้เห็นถึงการลดลงของกำลังรับน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเค้น พบว่าพฤติกรรมวิบัติของแผ่นพื้นคอมโพสิตยังคงถูกกำหนดโดยการครากตัวของตะแกรงเหล็ก (Wire mesh) ซึ่งรับความเค้นสูงสุดภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ โครงสร้างแบบจำลองสมมาตรหนึ่งในสี่ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เพียง 22.6 กิโลนิวตัน ก่อนเข้าสู่สภาวะวิบัติ



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) กับความเค้น (Stress) ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal หลังได้รับความร้อน

สรุปผลการประเมินกำลังรับน้ำหนักคงเหลือของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal ภายใต้สภาวะก่อนและหลังได้รับความร้อน ได้ถูกรวบรวมไว้ดังรายละเอียดในตารางที่ 8

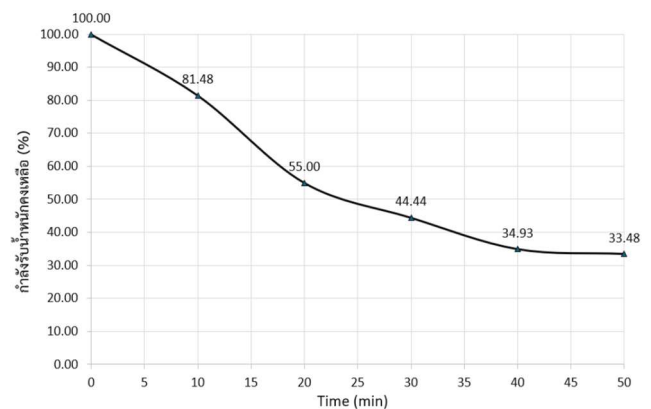
ตารางที่ 8 กำลังรับน้ำหนักคงเหลือของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรง Trapezoidal

ความสามารถในการรับน้ำหนัก (กิโลนิวตัน)		ความสามารถในการรับน้ำหนักคงเหลือ (%)	การสูญเสียกำลัง (%)
ก่อนการเกิดเพลิงไหม้	หลังเกิดเพลิงไหม้ตามอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 นาน 50 นาที และ อุณหภูมิสะสม 918 องศาเซลเซียส		
67.5	22.6	33.48	66.52

จากข้อมูลในตารางที่ 8 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal พบว่าในสภาวะก่อนได้รับความร้อน โครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดที่ 67.5 กิโลนิวตัน อย่างไรก็ตามภายหลังจากการจำลองสภาวะเพลิงไหม้ตามเส้นโค้งอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 เป็นระยะเวลา 50 นาที (ซึ่งมีอุณหภูมิสะสมสูงถึง 918 องศาเซลเซียส) กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของโครงสร้างลดลงเหลือเพียง 22.6 กิโลนิวตัน หรือคิดเป็นกำลังคงเหลือเพียงร้อยละ 33.48 เมื่อเทียบกับสภาวะเริ่มต้น

การลดลงอย่างมีนัยสำคัญของกำลังรับน้ำหนักนี้ มีสาเหตุหลักมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical properties degradation) โดยแผ่นเหล็กขึ้นรูป (Steel deck) ซึ่งอยู่ด้านล่างสุดจะสูญเสียกำลังรับแรงดึง (Tensile strength) อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสความร้อน ในขณะที่ตัวคอนกรีตก็จะสูญเสียกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) เช่นกัน ปัจจัยร่วมเหล่านี้จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักรวมของแผ่นพื้นคอมโพสิตเสื่อมถอยลงอย่างต่อเนื่องตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นภายในวัสดุ

เพื่อให้เห็นภาพรวมของพฤติกรรมการเสื่อมถอยทางโครงสร้างที่ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกเหนือจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ณ เวลา 50 นาที ผู้วิจัยจึงนำเสนอแนวโน้มและอัตราการลดลงของกำลังรับน้ำหนักอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลากำลองสภาวะเพลิงไหม้ โดยแสดงผลในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังรับน้ำหนักคงเหลือกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 15



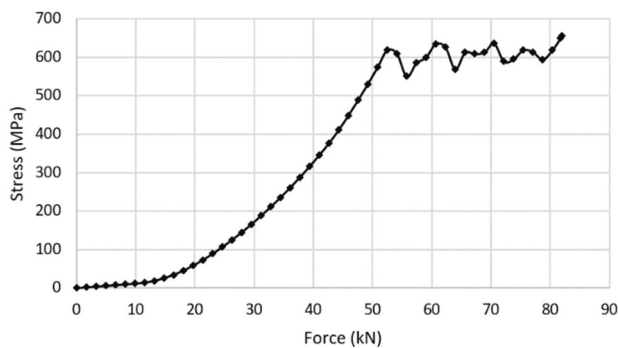
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักคงเหลือ (%) ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal กับ เวลา (min) เมื่ออุณหภูมิสะสมสูงถึง 918 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ISO 834 ระยะเวลา 50 นาที

2) แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant

2.1) กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของแผ่นพื้นคอมโพสิตก่อนได้รับความร้อน

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS ของแบบจำลองแผ่นพื้นคอมโพสิตรูปแบบหน้าตัด Re-entrant ในสภาวะก่อนได้รับความร้อน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก

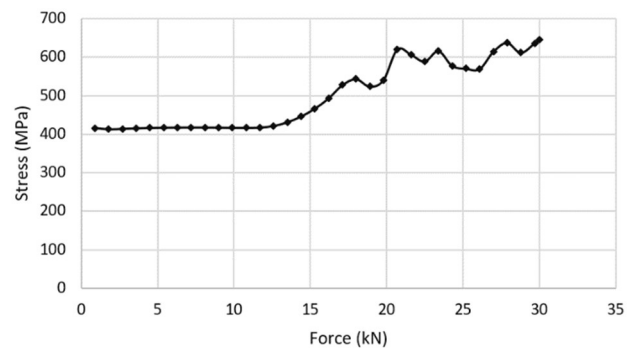
และความเค้น (Load-stress relationship) (รูปที่ 16) บ่งชี้พฤติกรรมในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ สภาวะวิบัติของโครงสร้างถูกกำหนดโดยการครากตัวของชิ้นส่วนตะแกรงเหล็ก (Wire mesh) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่รับความเค้นสูงสุด จากแบบจำลองพบว่า แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ณ จุดวิบัติได้ถึง 82 กิโลนิวตัน ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกใช้เป็นฐานอ้างอิง (Baseline) สำหรับการประเมินอัตราการสูญเสียกำลังเมื่อโครงสร้างเข้าสู่สภาวะเพลิงไหม้ในลำดับถัดไป



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) กับความเค้น (Stress) ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant ก่อนได้รับความร้อน

2.2) กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของแผ่นพื้นคอมโพสิตหลังได้รับความร้อน

ภายหลังจากการจำลองสภาวะเพลิงไหม้ตามเส้นโค้งอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 เป็นระยะเวลา 50 นาที ซึ่งแผ่นพื้นได้รับอุณหภูมิสะสมสูงถึง 918 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง ANSYS (รูปที่ 17) แสดงให้เห็นถึงการลดลงของกำลังรับน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับการถดถอยของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเค้น พบว่าพฤติกรรมการวิบัติของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant ยังคงถูกกำหนดโดยการครากตัวของตะแกรงเหล็ก (Wire mesh) ซึ่งเป็นวัสดุที่รับความเค้นสูงสุด และภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ โครงสร้างแบบจำลองสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ 30 กิโลนิวตัน ก่อนเข้าสู่สภาวะวิบัติ



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) กับความเค้น (Stress) ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant หลังได้รับความร้อน

สรุปผลการประเมินกำลังรับน้ำหนักคงเหลือของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant ภายใต้อุณหภูมิความร้อน และหลังได้รับความร้อน ได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 9

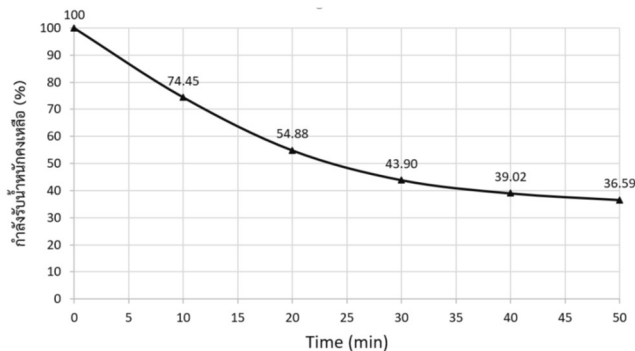
ตารางที่ 9 สรุปค่ากำลังรับน้ำหนักคงเหลือของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant

ความสามารถในการรับน้ำหนัก (กิโลนิวตัน)		ความสามารถในการรับน้ำหนัก คงเหลือ (%)	การสูญเสีย กำลัง (%)
ก่อนการเกิดเพลิงไหม้	หลังเกิดเพลิงไหม้ตามอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 นาน 50 นาที และอุณหภูมิสะสม 918 องศาเซลเซียส		
82	30	36.59	63.41

จากข้อมูลในตารางที่ 9 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant พบว่า ในสภาวะก่อนได้รับความร้อน โครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดที่ 82 กิโลนิวตัน อย่างไรก็ตาม ภายหลังจากการจำลองสภาวะเพลิงไหม้ตามเส้นโค้งอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 เป็นระยะเวลา 50 นาที (ซึ่งมีอุณหภูมิสะสมสูงถึง 918 องศาเซลเซียส) กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของโครงสร้างได้ลดลงเหลือเพียง 30 กิโลนิวตัน หรือคิดเป็นกำลังคงเหลือร้อยละ 36.59 เมื่อเทียบกับสภาวะเริ่มต้น เช่นเดียวกับการถดถอยของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal การลดลงอย่างมีนัยสำคัญของกำลังรับน้ำหนักนี้ มีสาเหตุหลักมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ

ของคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical properties degradation) โดยแผ่นเหล็กขึ้นรูป (Steel deck) สูญเสียกำลังรับแรงดึง (Tensile strength) อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสความร้อน ในขณะเดียวกัน เนื้อคอนกรีตก็จะสูญเสียกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) เช่นกัน ปัจจัยร่วมเหล่านี้จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักรวมของแผ่นพื้นคอมโพสิตเสื่อมถอยลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในวัสดุ

เพื่อให้เห็นภาพรวมของพฤติกรรมการเสื่อมถอยทางโครงสร้างที่ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกเหนือจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ณ เวลา 50 นาทีแล้ว ผู้วิจัยจึงนำเสนอแนวโน้มและอัตราการลดลงของกำลังรับน้ำหนักอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการจำลองสถานะเพลิงไหม้ โดยแสดงผลในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังรับน้ำหนักคงเหลือของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant กับเวลาการเกิดเพลิงไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักคงเหลือ (ร้อยละ) ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant กับเวลาการเกิดเพลิงไหม้ (นาที (min))

3.4. ความเป็นฉนวนของแผ่นพื้นคอมโพสิต

1) ประสิทธิภาพความเป็นฉนวนของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal

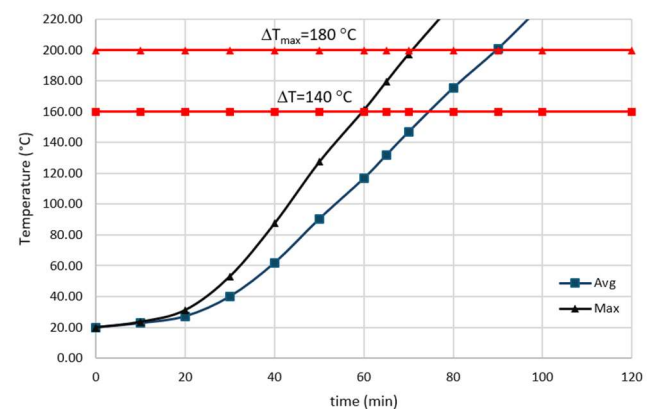
การประเมินประสิทธิภาพความเป็นฉนวนความร้อน (Insulation criterion) ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองแผ่นพื้นคอมโพสิตผ่านโปรแกรม ANSYS โดยจำลองสถานะเพลิงไหม้ตามเส้นโค้งอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 เป็นระยะเวลา 100 นาที และทำการตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง

S1 ถึง S9 บนพื้นผิวด้านที่ไม่สัมผัสไฟ (Unexposed surface) โดยอุณหภูมิแวดล้อมเริ่มต้นถูกกำหนดไว้ที่ $T_0 = 20$ องศาเซลเซียส ดังนั้น เกณฑ์วิกฤตความเป็นฉนวนตามมาตรฐาน ISO 834 จึงกำหนดให้อุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสไฟต้องไม่เกิน 160 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุด ณ จุดใดจุดหนึ่งต้องไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการประเมินแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 อุณหภูมิ ณ จุดตรวจวัด S1-S9 ของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal ภายหลังจากการจำลองสถานะเพลิงไหม้เป็นเวลา 100 นาที

Time (min)	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	Avg	Max
0	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
10	22.06	23.44	22.09	22.75	22.82	23.06	23.57	22.95	22.45	22.80	23.57
20	22.36	31.29	22.89	30.73	23.93	29.22	28.58	28.88	27.12	27.22	31.29
30	23.90	53.23	26.57	53.22	28.06	46.54	42.21	45.67	41.93	40.15	53.23
40	29.01	87.33	36.59	87.60	37.58	74.18	65.79	73.02	67.27	62.04	87.60
50	40.10	127.06	54.51	127.46	54.62	107.79	96.14	106.66	100.02	90.48	127.46
60	54.06	160.82	74.53	161.25	73.95	137.26	123.67	136.29	129.92	116.86	161.25
65	63.25	179.13	86.94	179.57	85.94	153.52	139.07	152.65	146.68	131.86	179.57
70	73.24	197.05	99.92	197.49	98.51	169.62	154.44	168.86	163.40	146.95	197.49
80	93.73	230.09	125.21	230.56	123.18	199.63	183.31	199.08	194.83	175.51	230.56
90	115.20	261.75	150.84	262.26	148.38	228.90	211.68	228.56	225.72	200.95	262.26
100	138.27	293.54	177.76	294.10	175.07	258.79	240.88	258.70	257.46	229.64	294.10

นอกจากนี้ ข้อมูลจากการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการได้รับความร้อนกับอุณหภูมิบนพื้นผิว (ทั้งค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุด) เพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ถูกเพลิงไหม้กับอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดที่จุดวัดทั้ง 9 จุด บนพื้นผิวด้านที่ไม่สัมผัสเพลิงของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal

จากข้อมูลในตารางที่ 10 และรูปที่ 19 พบว่า เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการเกิดเพลิงไหม้ 70 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยจากจุดตรวจวัด S1 ถึง S9 มีค่าเท่ากับ 146.95 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ (อุณหภูมิเฉลี่ยต้องเพิ่มขึ้นไม่เกิน 160 องศาเซลเซียส) ในขณะเดียวกัน อุณหภูมิสูงสุด ณ ตำแหน่งใด ๆ ในกลุ่มจุดตรวจวัดดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 197.49 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เกินเกณฑ์วิกฤต (อุณหภูมิสูงสุดต้องเพิ่มขึ้นไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส) เช่นกัน จากผลลัพธ์ดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่า แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal มีประสิทธิภาพในการรักษาความเป็นฉนวนความร้อนได้เป็นระยะเวลา 70 นาที โดยโครงสร้างสามารถต้านทานและป้องกันการถ่ายเทความร้อนส่วนเกินผ่านไปยังพื้นผิวด้านที่ไม่สัมผัสเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงเวลาดังกล่าว

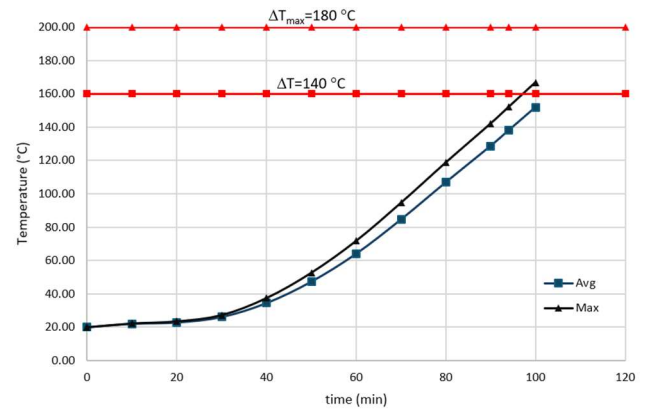
2) ประสิทธิภาพความเป็นฉนวนความร้อนของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant

เช่นเดียวกับการประเมินในหัวข้อก่อนหน้านี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพความเป็นฉนวนความร้อน (Insulation criterion) ของแบบจำลองแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant ผ่านโปรแกรม ANSYS โดยจำลองสภาวะเพลิงไหม้ตามเส้นโค้งอุณหภูมิมาตรฐาน ISO 834 เป็นระยะเวลา 100 นาที และทำการตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง S1 ถึง S9 บนพื้นผิวด้านที่ไม่สัมผัสเพลิง (Unexposed surface) ซึ่งผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 อุณหภูมิ ณ จุดตรวจวัด S1-S9 ของแผ่นพื้น คอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant ภายหลังการจำลองสภาวะเพลิงไหม้เป็นเวลา 100 นาที

Time (min)	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	Avg	Max
0	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
10	22.13	22.26	22.06	22.05	22.10	22.02	22.06	22.07	22.06	22.09	22.26
20	23.08	23.52	23.00	22.94	22.68	22.41	22.69	22.66	22.61	22.84	23.52
30	27.29	27.15	27.06	27.01	25.39	25.01	25.42	25.46	25.49	26.14	27.29
40	37.50	35.62	36.36	36.37	32.90	32.62	32.90	33.06	32.94	34.47	37.50
50	52.68	48.48	49.84	49.92	45.10	45.02	45.03	45.25	44.48	47.31	52.68
60	71.81	65.23	66.91	67.07	61.41	61.54	61.29	61.46	59.67	64.04	71.81
70	94.64	85.78	87.61	87.81	81.66	82.03	81.57	81.62	78.57	84.59	94.64
80	118.80	108.12	109.94	110.16	103.77	104.39	103.86	103.57	99.39	106.89	118.80
90	142.18	130.00	131.73	131.95	125.49	126.26	125.69	125.12	119.97	128.71	142.18
94	152.07	139.29	140.98	141.2	134.73	135.55	134.96	134.29	128.75	137.98	152.07
100	166.90	153.27	154.89	155.11	148.63	149.51	148.90	148.10	141.99	151.92	166.90

เพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนอย่างต่อเนื่อง จึงนำข้อมูลหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการได้รับความร้อนและอุณหภูมิบนพื้นผิว (ทั้งค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุด) ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ถูกเพลิงไหม้กับอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุด ณ จุดวัดทั้ง 9 จุด บนพื้นผิวด้านที่ไม่สัมผัสเพลิงของแผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant

จากข้อมูลในตารางที่ 11 และรูปที่ 20 พบว่า เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการเกิดเพลิงไหม้ 100 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยจากจุดตรวจวัด S1 ถึง S9 มีค่าเท่ากับ 151.92 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ (อุณหภูมิเฉลี่ยต้องเพิ่มขึ้นไม่เกิน 160 องศาเซลเซียส) ในขณะเดียวกัน อุณหภูมิสูงสุด ณ ตำแหน่งใด ๆ ในกลุ่มจุดตรวจวัดดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 166.90 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เกินเกณฑ์วิกฤต (อุณหภูมิสูงสุดต้องเพิ่มขึ้นไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส) เช่นกัน จากผลลัพธ์ดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่า แผ่นพื้นคอมโพสิตที่มีรูปทรงหน้าตัด Re-entrant มีประสิทธิภาพในการรักษาความเป็นฉนวนความร้อนได้ยาวนานถึง 100 นาที โดยโครงสร้างสามารถต้านทานและป้องกันการถ่ายเทความร้อนส่วนเกินผ่านไปยังพื้นผิวด้านที่ไม่สัมผัสเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงเวลาดังกล่าว

4. อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์พฤติกรรมการทนไฟของแผ่นพื้นคอมโพสิตรูปทรงหน้าตัด Trapezoidal และ Re-entrant ภายใต้อุณหภูมิเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834 สรุปได้ดังนี้:

1) การถ่ายเทความร้อน: รูปทรงเรขาคณิตของหน้าตัด Re-entrant ช่วยชะลออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามแนวความหนาของแผ่นพื้นได้ดีกว่าหน้าตัด Trapezoidal เนื่องจากลอนเหล็กส่วนบนที่บิดบังเปลวไฟช่วยลดการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่เนื้อคอนกรีต

2) กำลังรับน้ำหนักคงเหลือ: ณ เวลา 50 นาที หน้าตัด Re-entrant ให้กำลังรับน้ำหนักสัมบูรณ์สูงกว่า Trapezoidal (30.0 กิโลนิวตัน เทียบกับ 22.6 กิโลนิวตัน จากกำลังเริ่มต้น 82.0 กิโลนิวตัน และ 67.5 กิโลนิวตัน ตามลำดับ) โดยมีสัดส่วนกำลังคงเหลือใกล้เคียงกันคือร้อยละ 36.59 และร้อยละ 33.48 (แตกต่างกันร้อยละ 3.11)

3) ระยะเวลาความเป็นฉนวน: หน้าตัด Re-entrant สามารถยืดระยะเวลาความเป็นฉนวนความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 70 นาที เป็น 100 นาที คิดเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงปริมาณ 42.86% (30 นาที) เมื่อเทียบกับหน้าตัด Trapezoidal โดยสรุป หน้าตัด Re-entrant มีสมรรถนะการทนไฟโดยรวมเหนือกว่า Trapezoidal โดยเฉพาะการยืดระยะเวลาความเป็นฉนวนและการรักษากำลังรับน้ำหนักสัมบูรณ์ ณ อุณหภูมิสูง

การศึกษานี้ประเมินพฤติกรรมความต้านทานไฟผ่านการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical simulation) โดยไม่ได้พิจารณาปรากฏการณ์การกระเทาะของคอนกรีต (Concrete spalling) รวมถึงการหลุดร่อนระหว่างชั้นวัสดุ (Interfacial debonding) เพื่อการยืนยันผลการศึกษานี้ งานวิจัยในอนาคตควรทำการทดสอบเผาจริงด้วยเตาทดสอบทนไฟ (Full-scale furnace fire testing) ตามมาตรฐาน ISO 834 เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง (Experimental validation) ของการกระจายอุณหภูมิ ประวัติการแอ่นตัว และพฤติกรรมการยึดเกาะทางกล ณ อุณหภูมิสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lawson RM, Mullett DL, Rackham JW. *Design of composite slabs and beams with steel decking*. Ascot: The Steel Construction Institute; 1997.
- [2] Li GQ, Wang PC. *Advanced analysis and design of steel frames*. Chichester: John Wiley & Sons; 2013.
- [3] Guo S, Bailey CG. Experimental behaviour of composite slabs during the heating and cooling

fire stages. *Engineering Structures*. 2011;33(2):563–571.

doi:10.1016/j.engstruct.2010.11.014.

- [4] Nguyen MP, Nguyen TT, Tan KH. Temperature profile and resistance of flat decking composite slabs in- and post-fire. *Fire Safety Journal*. 2018;98:109–119. doi:10.1016/j.firesaf.2018.04.001.
- [5] สมฤทัย คงระกำ, เวณี ฤกษ์สโมสร, วิศรุต ฤกษ์สโมสร, ภักจิรา อ่อซ่าย, ทนงศักดิ์ อิ่มใจ. พฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นคอมโพสิต Metal deck ที่มีช่องเปิดภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกค้ำและไฟไหม้. ใน: *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*; 24–26 สิงหาคม 2565; เชียงราย.
- [6] Alencar Filho MM, Piloto PAG, Balsa C. The load-bearing of composite slabs with steel deck under natural fires. *AIMS Materials Science*. 2022;9(1):150–171. doi:10.3934/matensci.2022010.
- [7] Sundararooban SR, Krishnan PA. Finite element modelling of the behavior of profiled composite deck slab subjected to bending. *International Journal of Advanced Research in Basic Engineering Sciences and Technology*. 2017;3 (Special Issue).
- [8] Ribeiro FF. *Numerical simulation of composite slabs with steel deck under fire conditions*. Master's thesis. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança; 2019.
- [9] Piloto PAG, Balsa C, Gomes FMM, Matias B. Fire resistance of composite slabs with steel deck under natural fire. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2021;12(4):522–540. doi:10.1108/JSFE-02-2021-0009.
- [10] Balsa C, Silveira M, Mange V, Piloto PAG. Modelling the thermal effects on structural components of composite slabs under fire conditions. *Computation*. 2022;10(6):94. doi:10.3390/computation10060094.

- [11] Chaudhary RK, Gernay T, Lucherini A, Van Coile R. Probabilistic characterization of the performance of a composite slab panel during and after fire. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 2021)*; 2021 Jun 21–25; Shanghai, China. 2022.
- [12] Trinh HD, Kohno M. Thermal analysis of composite slabs based on experiment and numerical simulations. *Fire Technology*. 2025;61:631–654. doi:10.1007/s10694-024-01629-2.
- [13] Lakhal A, Bougara A, Benlakehal N. Equivalent fire resistance of composite slab made with lightweight concrete. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. 2025;67(1):13–25. doi:10.17159/2309-8775/2025/v67n1a2.
- [14] ANSYS Inc. *ANSYS Mechanical user's guide. Release 2022 R2*. Canonsburg (PA): ANSYS Inc.; 2022.
- [15] European Committee for Standardization. *EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-2: General rules—Structural fire design*. Brussels: European Committee for Standardization; 2004.
- [16] European Committee for Standardization. *EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-2: General rules—Structural fire design*. Brussels: European Committee for Standardization; 2005.
- [17] European Committee for Standardization. *EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures—Part 1-2: General rules—Structural fire design*. Brussels: European Committee for Standardization; 2005.