



นวัตกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปจากเศษคอนกรีตย่อยเสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมแรงสำหรับพื้นคอกปศุสัตว์

สุพชัย ทิพย์ภักดี

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ภคจิรา อ่อซ่าย ปานขวัญ เจริญฤทธิ์ ญัฐนนท์ รามณี นรสิงห์ อินมณเฑียร และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ*

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านจัดการภัยพิบัติอย่างยั่งยืน สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7567 2399 อีเมล: thanongsak_im@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.05.05

รับเมื่อ 6 กันยายน 2564 แก้ไขเมื่อ 13 มกราคม 2565 ตอรับเมื่อ 8 กุมภาพันธ์ 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 9 พฤษภาคม 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการออกแบบนวัตกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปจากเศษคอนกรีตย่อยเสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมแรง WU-ecoSLAT สำหรับพื้นคอกปศุสัตว์ และศึกษาประสิทธิภาพการรับน้ำหนักเทียบกับพื้นสำเร็จที่จำหน่ายในท้องตลาด โดยแผ่นพื้นพัฒนาในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุมวลรวมจากเศษวัสดุคอนกรีต สามารถออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปเสริมแรงด้วยวัสดุคอมโพสิต ที่รับน้ำหนักมากกว่า 2 เท่าเทียบกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในท้องตลาดที่ขนาดเดียวกัน จากผลการทดสอบพบว่าการออกแบบแผ่นพื้นสำเร็จรูป ให้ความสามารถในการรับน้ำหนักที่สูงกว่าประเภทที่จำหน่ายในท้องตลาด และมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมเหล็ก ในส่วนของการวิเคราะห์โมเมนต์ของหน้าตัดจากสมการ ACI-440.1R พบว่า โมเมนต์หน้าตัดของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปเสริมแรงด้วยวัสดุคอมโพสิตให้ค่าที่ต่ำกว่ากับผลการทดสอบ ร้อยละ 20 ซึ่งเมื่อเทียบกับจากการวิเคราะห์แบบจำลองที่ใช้การจำลองการวิบัติของคอนกรีตแบบ Concrete Damage Plasticity Model สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปเสริมแรงด้วยวัสดุคอมโพสิต ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ร้อยละ 5-10

คำสำคัญ: พื้นสแลท พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป เศษคอนกรีตย่อย แท่งพอลิเมอร์เสริมแรง คอกหมู

การอ้างอิงบทความ: สุพชัย ทิพย์ภักดี, ภคจิรา อ่อซ่าย, ปานขวัญ เจริญฤทธิ์, ญัฐนนท์ รามณี, นรสิงห์ อินมณเฑียร และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ, “นวัตกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปจากเศษคอนกรีตย่อยเสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมแรง สำหรับพื้นคอกปศุสัตว์,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, หน้า 1-16, เลขที่บทความ 243-035396, ก.ค.-ก.ย. 2567.



Innovative Precast Concrete Slabs Made from Recycled Concrete Reinforced with Frps for Stockyard Constructions

Suppachai Tippakdee

The Center for Scientific and Technological Equipment, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

Pakjira Aosai, Parnkwan Chareanrit, Nattanon Rammanee, Norrasing Inmontien, and Thanongsak Imjai*

Center of Excellence in Sustainable Disaster Management, School of Engineering and Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7567 2399, E-mail: thanongsak_im@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.05.05

Received 6 September 2021; Revised 13 January 2022; Accepted 8 February 2022; Published online: 9 May 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research presents a concurrent engineering approach for designing precast concrete slat units (WU-ecoSLAT) made from recycled aggregate concrete reinforced with composite bars for pig slatted flooring. Precast slats are made from 100% recycled concrete aggregates to replace the natural coarse aggregate. A total of 12 test specimens were constructed and tested under four-point bending to assess the moment capacity of the WU-ecoSLAT units, compared to that of the commercially available slats. Based on the test results, it was found that the moment capacity of WU-ecoSLAT was higher than the commercial units by 3 times. Analytical and numerical studies were also carried out to investigate the load-carrying capacity of the WU-ecoSLAT units. Due to the nature of the opening of the slat unit, the analytical predicted moment capacities were less than the experimental values by up to 20%. However, when the concrete damage plasticity models were used in finite element analysis, numerical predictions were shown to agree well with the experimental values (by 5-10%).

Keywords: Slatted Floor, Precast Concrete Slab, Recycled Concrete, Fiber-reinforced Polymers, Pig Houses

Please cite this article as: S, Tippakdee, P. Aosai, P. Chareanrit, N. Rammanee, N. Inmontien, and T. Imjai, "Innovative precast concrete slabs made from recycled concrete reinforced with FRPs for stockyard constructions," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 3, pp. 1–16, ID. 243-035396, Jul.–Sep. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีอายุการใช้งานก่อสร้างมาอย่างยาวนาน มักประสบปัญหาด้านการกัดกร่อนจากสารเคมี หรือการก่อสร้างใช้งานในสภาพสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ในอาคารที่ปนเปื้อนสารเคมี ก๊าซพิษ หรือในงานที่มีการชะล้างบ่อยครั้ง หรือสัมผัสกับความชื้นตลอดเวลา เช่น อาคารคอกปศุสัตว์ ซึ่งจะทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กแบบดั้งเดิม ปัญหาด้านการเกิดสนิมเหล็กภายในองค์อาคารคอนกรีต และทำให้อายุการใช้งานขององค์อาคารคอนกรีต เช่น พื้น มีอายุการใช้งานที่สั้นลง ทำให้ผู้ประกอบการ เกษตรกร ต้องมีการซ่อมแซมความเสียหายจากสาเหตุดังกล่าว ทุก ๆ 3-5 ปี [1]-[3]

จากปัญหาดังกล่าวได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาวัสดุมาทดแทนเหล็กเสริม ที่มีคุณสมบัติรับแรงได้มากกว่าเหล็กเสริมแบบดั้งเดิมและไม่เป็นสนิม เรียกว่า แท่งพอลิเมอร์ เสริมแรง (Fiber reinforced Polymer Rod; FRPs) มาใช้ทดแทนเหล็กเสริมคอนกรีต สำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตในงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ ทั้งงานโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่และขนาดเล็กทั่วไป อาทิ อาคาร ไซ้รูม โกดัง โรงงาน หลังคาคลุมสนามกีฬา หอประชุม คลังสินค้า หลังคาคลุมสระว่ายน้ำ โรงจอดรถ หลังคาคลุมลานอเนกประสงค์ โดยใช้วัสดุแท่งพอลิเมอร์เสริมแรง ที่ใช้ทดแทนเหล็กเสริมคอนกรีตแบบดั้งเดิม เช่น ในต่างประเทศ [4] ซึ่งกำหนดวิธีการออกแบบตามมาตรฐานสหรัฐอเมริกา [5] หรือทางยุโรป [6], [7]

ในอดีตแท่งพอลิเมอร์เสริมแรง จะมีราคาสูงกว่าเหล็กเสริมคอนกรีตแบบดั้งเดิม เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งจะมีราคาสูงกว่าเหล็กประมาณ 1-3 เท่า เทียบจากน้ำหนักที่เท่ากัน ในปัจจุบันการผลิตวัสดุแท่งพอลิเมอร์เสริมแรงสามารถผลิตได้ในประเทศไทยและใช้วัสดุในประเทศไทยในกระบวนการผลิต ทำให้ราคาต้นทุนวัสดุแท่งพอลิเมอร์เสริมแรงใกล้เคียงกับเหล็กเสริม ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุพอลิเมอร์เสริมแรงที่ผลิตภายในประเทศไทยมาใช้ในการก่อสร้างและพัฒนาแผ่นพื้นสำเร็จรูปในงานก่อสร้างพื้นคอกปศุสัตว์ เพื่อเป็นทางเลือกแทนระบบพื้นเสริมเหล็กแบบดั้งเดิมที่มัก

ประสบปัญหาจากการกัดกร่อนจากสารเคมีและความชื้น เนื่องจากทำการก่อสร้างได้รวดเร็ว เมื่อเทียบกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กแบบดั้งเดิม และนอกจากนั้นยังยืดอายุการใช้งาน และลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา

1.2 การออกแบบแผ่นพื้นเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสม

ในงานศึกษาวิจัยนี้ผู้วิจัยประยุกต์ใช้วิธีทางวิศวกรรม (Concurrent Engineering) [8] ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer Aided-Design; CAD) สำหรับหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด [9] สำหรับระบบแผ่นในงานก่อสร้างสำหรับพื้นคอกปศุสัตว์

1.2.1 ระบบแผ่นในงานก่อสร้างสำหรับพื้นคอกปศุสัตว์

ระบบแผ่นในงานก่อสร้างสำหรับพื้นคอกปศุสัตว์ในประเทศไทย เช่นกรณีนี้จะออกแบบสำหรับคอกสุกร ซึ่งจะมีค่าน้ำหนักบรรทุกจร ประมาณ 400 กก./ตร.ม. สำหรับแม่สุกร ลูกสุกร ในระยะช่วงการเติบโตระยะต่าง ๆ [10] และสำหรับประเภทอาคาร เช่น อาคารโรงเลี้ยงสัตว์ หรือคอกปศุสัตว์ที่มีการใช้ระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบดั้งเดิมสำหรับปูพื้นอาคาร ดังรูปที่ 1 (ก) และ รูปที่ 1 (ข)

ในประเทศไทยระบบพื้นสำหรับคอกสุกร ต้องสามารถระบายน้ำ และมีน้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ และสามารถรับน้ำหนักจากสุกรได้ การใช้แผ่นพื้นสมัยใหม่ เช่น พลาสติก มีราคาสูงกว่าระบบพื้นโดยใช้คอนกรีต แบบดั้งเดิมเป็นระบบคอนกรีตอัดแรง (รูปที่ 1 (ค)) ซึ่งแบบดั้งเดิมมีราคาในท้องตลาดประมาณ 250 บาท/แผ่น สำหรับแผ่นขนาด 105 × 60 ซม.หนา 5 ซม. และมีน้ำหนักประมาณ 50 กก./แผ่น [2], [10] แต่ระบบดังกล่าวมีระยะหุ้มถึงเหล็กเสริมเพียง 10 มม. ทำให้เกิดปัญหาสนิมในเหล็กเสริมขณะใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดออกแบบระบบพื้นต้นแบบที่ใช้วัสดุทดแทนเพื่อลดการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนตลอดอายุการใช้งาน

1.2.2 กระบวนการทางวิศวกรรม

วิธีการทางวิศวกรรมร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ ดังรูปที่ 2 สำหรับหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Design) จะเริ่มจากการกำหนดเป้าหมาย คือ



(ก) การติดตั้งแผ่นพื้นในคอกสุกร



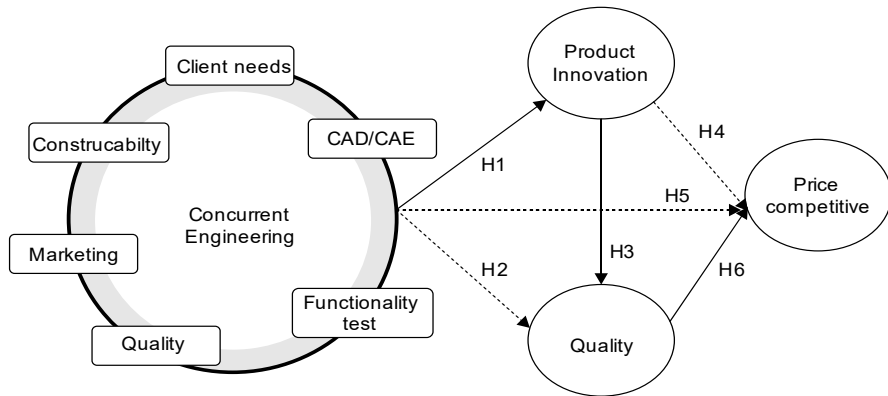
(ข) การชะล้างแผ่นพื้นคอนกรีตในโรงเลี้ยงสุกร

(ค) ความเสียหายแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก
รูปที่ 1 แผ่นพื้นคอนกรีตในโรงเลี้ยงสุกรในประเทศไทย

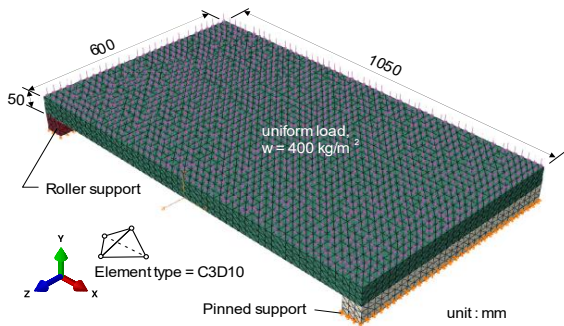
ต้นทุนต่ำแต่คงประสิทธิภาพตอบโจทย์ผู้ใช้งาน (Client needs/Functionality/Quality) สามารถก่อสร้างได้จริง (Constructability) และมีความเป็นไปได้ทางตลาด (Marketing) ในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ต้นแบบ จะกำหนดสมมติฐานของผลิตภัณฑ์ต้นแบบตามสมมติฐานเงื่อนไขที่กำหนดไว้ เช่น ต้องมีความเป็นนวัตกรรม (Product Innovation) คือ H3: มีคุณภาพดีกว่าเดิม และ H4: มีความสามารถแข่งขันด้านราคาจำหน่าย (Price Competitive) เป็นต้น โดยผลการออกแบบ และสมมติฐานเงื่อนไข จะนำไปสู่การออกแบบรูปทรงแผ่นพื้นต้นแบบ ร่วมกับการใช้คอมพิวเตอร์ 3 มิติ ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ [11]

1.2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต้นแบบ การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต้นแบบ โดยโปรแกรม ABAQUS [12] ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยต่อเนื่อง [13] ระหว่างมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ร่วมกับ University of Warwick (พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แผ่นพื้นต้นแบบ) โดยแบบจำลองรูปแบบชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโครงสร้างคอนกรีต คือ ชนิด 10-node Quadratic Tetrahedron (C3D10) ใน Library ของโปรแกรม ABAQUS Version 6.14 ซึ่งเป็นการสร้างรูปแบบเอลิเมนต์ภายในขอบเขตตามที่ผู้ใช้กำหนด (User Define) การวิเคราะห์เริ่มต้นนี้ใช้สำหรับออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตต้นแบบ (การวิเคราะห์ระยะแรกนี้จะพิจารณาเฉพาะคอนกรีตเพียงอย่างเดียวไม่รวมผลของวัสดุเสริมแรง) และกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่ใช้งานจริง (ค่าน้ำหนักแผ่กระจาย $w = 400$ กก./ตร.ม.) กำหนดคุณสมบัติวัสดุคอนกรีต Modulus of Elasticity = 32 MPa, Poisson's ration = 0.20

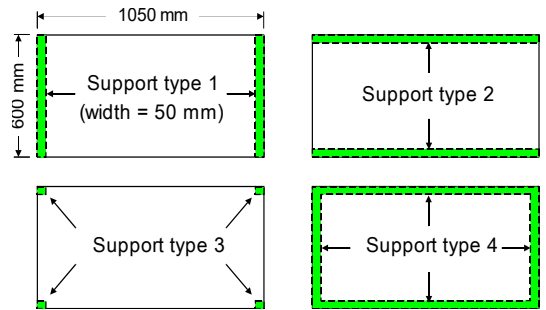
1.2.4 การศึกษาอิทธิพลจากรูปแบบฐานรองรับแผ่นพื้น การศึกษารูปแบบของฐานที่รองรับแผ่นพื้น ซึ่งมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพ เช่น หน่วยแรงและการเสียรูปของแผ่นพื้น โดยการศึกษาในระยะที่ 1 จะกำหนดรูปแบบการวางฐานที่รองรับ 4 รูปแบบ ดังรูปที่ 4 และทำการวิเคราะห์แบบสมมาตรทั้งสองแกนซึ่งสามารถประหยัดทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลได้



รูปที่ 2 กระบวนการ Concurrent Engineering [8]



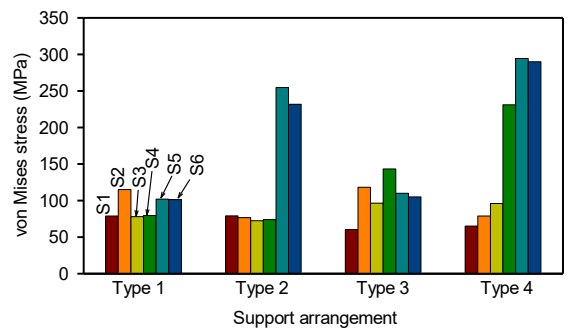
รูปที่ 3 การพัฒนาแบบจำลอง 3 มิติ ทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4 รูปแบบฐานที่รองรับของแผ่นพื้นในการวิเคราะห์แบบจำลอง

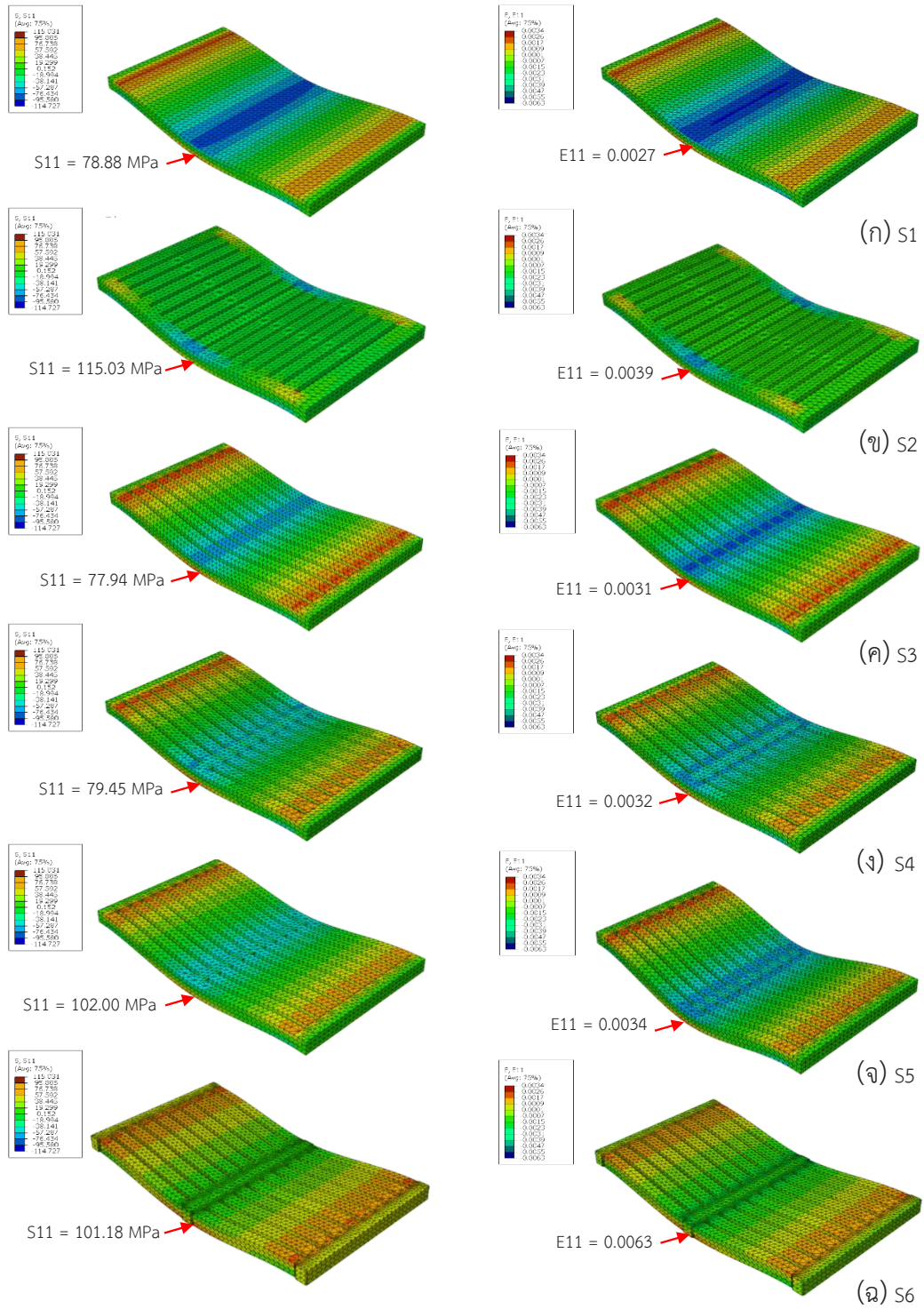
รูปที่ 5 และ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงคอนกรีต ของแผ่นพื้นทั้ง 6 รูปแบบ สำหรับรูปแบบฐานที่รองรับประเภทต่าง ๆ คณะวิจัยได้เริ่มต้นการวิเคราะห์ของแผ่นพื้นแบบตัน (S1) และทำการลดน้ำหนักของแผ่นพื้นโดยมีการเพิ่มช่องว่างในรูปแบบต่าง ๆ ตามลักษณะการรับน้ำหนัก (ตัวอย่าง S2-S6) ซึ่งจะพบว่าแผ่นพื้น S1 เมื่อมีการวางที่รองรับแบบทางเดียวทั้งด้านสั้นและด้านยาว และแบบสองทาง จะมีประสิทธิภาพในการรับแรงได้ดีที่สุด หรือเกิดค่าความเค้น (Von Mises) น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้แผ่นพื้นแบบตันจะมีน้ำหนักวัสดุมากกว่าแผ่นพื้นประเภทอื่น

การออกแบบขนาดช่องเปิด ในพื้นประเภทต่าง ๆ จะพิจารณาตามขนาดของกิบเท้าของสุกร ที่ต้องป้องกันมิให้เกิดอันตรายต่อเท้าสุกร เช่น กิบเท้าสามารถเดินไปมาได้ อย่างสะดวก ซึ่งช่องว่างด้านบนจะใช้เท่ากับ 15 มม. [1], [2] ตลอดทั้งแผ่นพื้น (ตัวอย่าง S2 และ S3) และเมื่อพิจารณา



รูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงคอนกรีต

หน่วยแรง ที่เกิดขึ้น เมื่อใช้ฐานที่รองรับแบบทางเดียว ซึ่งเป็นการวางแผ่นพื้นที่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม (Support Type 1) พบว่า ตัวอย่างที่ S2 มีค่าหน่วยแรงสูงที่สุด ตามด้วยตัวอย่าง S5 และ S6 ตามลำดับ สำหรับรูปแบบการวางแผ่นพื้นประเภทต่าง ๆ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ กรณีเกษตรกร



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงและความเครียดของแบบจำลองต่างๆ สำหรับกรณีฐานที่รองรับ (รูปแบบที่ 1)

สุพชัย ทิพย์ภักดี และคณะ, “นวัตกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปจากเศษคอนกรีตย่อยเสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมแรง สำหรับพื้นคอกอปกุสัตว์.”

ผู้ใช้งานขาดความรู้เชิงวิศวกรรม เช่นวางกรณีฐานรองรับ เฉพาะบริเวณมุมทั้งสี่ (Type 3) หรือวางตลอดแนวขอบ ทั้งสี่ด้าน (Type 4) ซึ่งนำมาสู่การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์และเพื่อพิจารณาหารูปแบบที่ดีที่สุด ในแง่ของ การรับน้ำหนักได้ตามเกณฑ์การใช้งาน และลดต้นทุนค่าวัสดุ (เช่น น้ำหนักของแผ่นพื้น) คณะวิจัยได้พัฒนารูปแบบแผ่นพื้น S6 ซึ่งมีช่องเปิดเป็นลักษณะด้านบนแคบ (กว้าง 15 มม.) และ ขยายกว้างที่ด้านล่าง (กว้าง 40 มม.)

1.2.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคอนกรีตและต้นทุนวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณคอนกรีต และราคาต้นทุน สำหรับแผ่นพื้นสแลทแต่ละรูปแบบ ซึ่ง คำนวณจากปริมาตร และใช้หน่วยน้ำหนักจริงของคอนกรีต ในการคำนวณน้ำหนัก (ค่านี้จะใช้ในการตรวจวัดสอบเทียบ ในระยะที่ 2 ที่ทำการก่อสร้างแผ่นพื้นต้นแบบจริง) มูลค่า ปริมาณคอนกรีตสำหรับกำลังอัดระบุ 320 กก./ cm^2 เท่ากับ 2,000 บาทต่อ ลบ.ม. ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแผ่นพื้นสำเร็จ รูปแบบ S6 มีมูลค่าต้นทุนเฉพาะคอนกรีตต่ำที่สุด และมีความ เหมาะสมในการนำไปใช้จริง ซึ่งจะมีการทดสอบประสิทธิภาพ การรับน้ำหนักในห้องปฏิบัติการในระยะที่ 2 ต่อไป

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบปริมาณคอนกรีต และราคาต้นทุน

รูปแบบ	ปริมาตร (ลบ.ม)	น้ำหนัก (กก.)	ต้นทุนวัสดุ (บาท)	S11/m
S1	0.0315	80.91	63	0.97
S2	0.0254	65.19	51	1.76
S3	0.0250	64.27	50	1.21
S4	0.0212	54.39	42	1.46
S5	0.0248	63.57	50	1.60
S6	0.0204	52.32	40	1.93

หมายเหตุ: คิตรายาคำนวณเฉพาะปริมาณคอนกรีต เท่ากับ 2,000 บาท ต่อ 1 ลบ.ม สำหรับกำลังอัดระบุเท่ากับ 320 กก./ cm^2

ในตารางที่ 1 พบว่า เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่าง ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่บริเวณกลางแผ่นพื้นต่อค่าน้ำหนักของ แผ่นพื้น (S11/m) พบว่า แผ่นพื้นรูปแบบ S6 มีค่ามากที่สุด แสดงถึงประสิทธิภาพในการรับแรงที่ดี ในขณะที่คองไว้ซึ่ง

น้ำหนักที่แผ่พื้นที่น้อยที่สุด (52.32 กก.)

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 ระยะ ซึ่งระยะที่ 1 คณะวิจัย ใช้วิธีทางการวิศวกรรม ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย ออกแบบหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบแผ่นใน งานก่อสร้างสำหรับพื้นคอกปศุสัตว์ และในระยะที่ 2 ทำการ ทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของแผ่นพื้นที่พัฒนารูปแบบจาก งานระยะที่ 1 โดยทำการก่อสร้างพื้นต้นแบบ เพื่อทดสอบ ประสิทธิภาพในการใช้งาน และในระยะที่ 3 คณะวิจัยได้ ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และผลจากสมการ ACI 440.1R [14] ร่วมกับผลการวิเคราะห์ แบบจำลองไฟไนต์อิเลเมนต์

2.1 ระบบพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป พื้นสแลทคอนกรีตต้นแบบ Walailak Eco-friendly Slat (WU-eoSLAT)

แนวคิดของการออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก แบบดั้งเดิม (พื้นสแลทคอนกรีต หรือในตลาดเรียกว่า Slat Concrete) สำหรับปูพื้นอาคารปศุสัตว์ เช่น สุกร ต้องมีการ ล้างโรงเลี้ยงโดยน้ำ ทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน พื้นคอนกรีต [15], [16] มีผลทำให้ผู้ประกอบการ เกษตรกร ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา และทำสุกรอาจจะ ตกลงในบริเวณคอนกรีตที่แตกร้าว ทำให้เกิดการบาดเจ็บ หรือป่วย อันจะทำให้ผลผลิตโดยรวมลดลง การพัฒนาพื้น สแลทคอนกรีตอัจฉริยะดูดซับกลิ่นไม่เป็นสนิม โดยพอลิเมอร์ เสริมเส้นใย สำหรับพื้นคอกปศุสัตว์ โดยความร่วมมือจาก นักวิจัยผู้เชี่ยวชาญจากมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ร่วมกับ ภาคเอกชน เพื่อตอบโจทย์ผู้ประกอบการ และเกษตรกร ใน อุตสาหกรรมปศุสัตว์ เพื่อพัฒนาพื้นสแลทคอนกรีตชนิดที่ โคร่งสร้างที่ไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรงทนทาน มีอายุการใช้งาน ที่ยาวนาน สามารถดูดซับกลิ่นได้ดี (ใช้ถ่านจากธรรมชาติ ในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อดูดซับกลิ่นจากสุกร) และมีการ ประยุกต์ใช้จากวัสดุธรรมชาติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (เศษ คอนกรีตเก่ามาทดแทนหินจากธรรมชาติ) เพื่อแก้ปัญหาจาก การใช้วัสดุโครงสร้างชนิดเดิมในการผลิตพื้นสแลทคอนกรีต

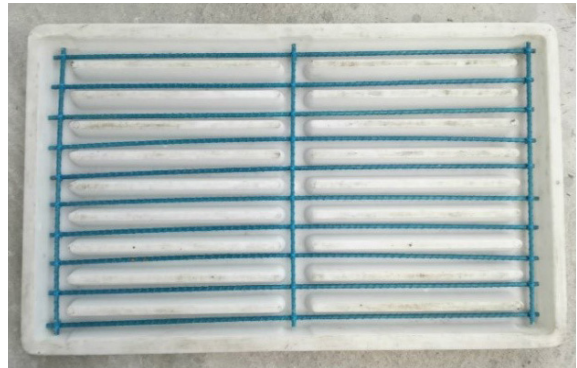
ของคอกปศุสัตว์/ฟาร์มเลี้ยงสัตว์มีอายุการใช้งานที่ไม่แน่นอน เนื่องจากโครงสร้างแบบดั้งเดิมเป็นสนิมเหล็ก มีการชำรุดเสียหายของพื้นสแลทคอนกรีตทำให้การรับน้ำหนักของสัตว์ไม่มีประสิทธิภาพ และยังต้องมีความมั่นคงแข็งแรงตามมาตรฐานการออกแบบโรงเรือนเลี้ยงสัตว์/คอกปศุสัตว์ ที่ต้องการให้พื้นสแลทคอนกรีตชนิดที่โครงสร้างไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรงทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งแนวคิดดังกล่าวจะนำมาศึกษาความเป็นไปได้เพื่อแก้ปัญหาและตอบโจทย์ความต้องการของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้จากการสนับสนุนทุนต่อการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่สภาพอุตสาหกรรม (Pre Mobility 2564) ร่วมกับมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ [17] ในการพัฒนานวัตกรรมพื้นสแลทคอนกรีตต้นแบบ Walailak Eco-friendly Slat (WU-ecSLAT)

2.2 คุณสมบัติของพอลิเมอร์เสริมแรงในงานพื้นคอกปศุสัตว์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 12 ตัวอย่าง ซึ่งมีขนาด 1,050 x 600 x 50 มม. มีการเสริมแรงด้วย เหล็กเสริมชั้นคุณภาพ ตาม มอก. SR24 คือ $\phi 6$, $\phi 9$ มม. (f_y เท่ากับ 235 เมกกะปาสกาล) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_s เท่ากับ 201 จิกะปาสกาล) และวัสดุคอมโพสิตแบบแท่ง (GFRP Rod) มีขนาด $\phi 4$, $\phi 6$, $\phi 9$ มม. และมีค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ย (f_{fu} เท่ากับ 700 เมกกะปาสกาล) และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{FRP} เท่ากับ 43 จิกะปาสกาล) เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบตัวอย่างจำนวน 9 ตัวอย่างของแต่ละขนาด รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างการติดตั้งวัสดุแท่งพอลิเมอร์เสริมแรงในแบบหล่อ ก่อนเทคอนกรีต

2.3 คุณสมบัติคอนกรีตจากเศษคอนกรีตย่อย

การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามมาตรฐาน ASTM C39 [18] เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) มีกำลังอัดระบุเท่ากับ 32 เมกกะปาสกาล ส่วนผสมคอนกรีตต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม ของคอนกรีต โดยมีการทดแทนมวลรวมหยาบทั้งหมดด้วยเศษคอนกรีตย่อย (Recycled



รูปที่ 7 ติดตั้งวัสดุแท่งพอลิเมอร์เสริมแรงในแบบหล่อ ก่อนเทคอนกรีต

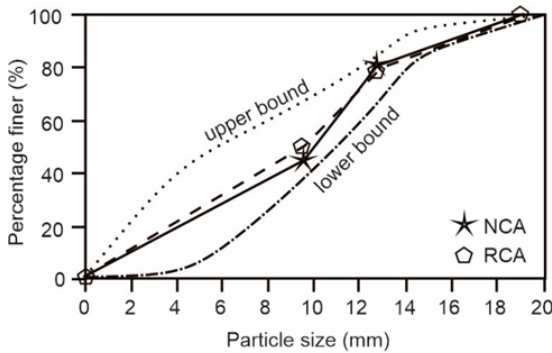
Concrete Aggregate; RCA) ในการก่อสร้างแผ่นพื้นต้นแบบ WU-ecoSLAT แสดงในตารางที่ 2-3 และรูปที่ 8 แสดงสัดส่วนคละและขนาดของมวลรวม

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม

ส่วนผสมคอนกรีต	สัดส่วน (กก.)
ปูนซีเมนต์	303
น้ำ	129
มวลรวมละเอียด (ทราย)	916
มวลรวมรีไซเคิล (หิน)	1028
สารลดน้ำ	0.25
อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	0.42
การยุบตัว (มม.)	75

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบและละเอียด

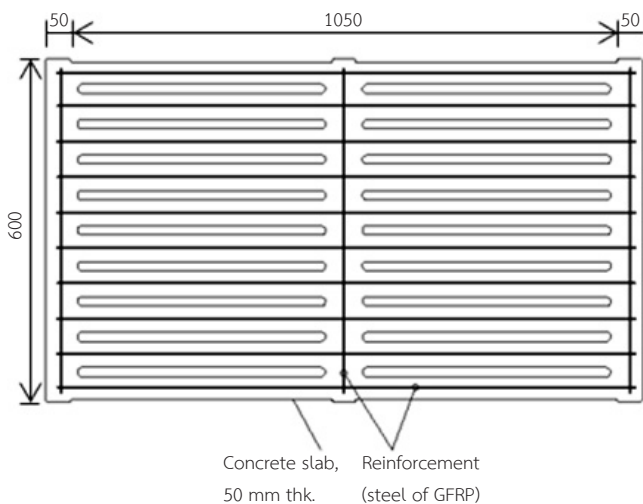
คุณสมบัติทางกายภาพ	RCA	FA
ขนาดใหญ่สุด (มม.)	18.6	4.76
ความกว้างจำเพาะ	2.53	2.63
การดูดซึมน้ำ (%)	5.4	1.2
โมดูลัสความละเอียด	7.6	3.51
Impact value (%)	13.4	-
การบดอัด (%)	23.12	-
Residual mortar (%)	32.5	-



รูปที่ 8 สัดส่วนมวลและขนาดของมวลรวม

2.4 การทดสอบประสิทธิภาพการรับน้ำหนัก

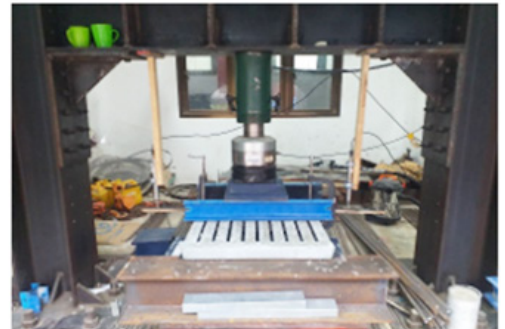
การให้น้ำหนักคานบรรทุกทดสอบ ติดตั้งโดยเครื่อง UTM ขนาด 100 ตัน ติดตั้งคานทดสอบวางไว้บน Roller Support และนำแผ่นพื้นทดสอบขนาดความยาว 1,050 มม. ดังในรูปที่ 9 แผ่นพื้นวางพาดบนฐานที่รองรับเพื่อถ่ายน้ำหนักไปยังปีกคานทั้งสองฝั่งเพื่อให้เกิดโมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางคาน



รูปที่ 9 การให้น้ำหนักบรรทุก อุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิค และรายละเอียดพื้นทดสอบ (หน่วยเป็น มม.)

และวัดการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นโดยอุปกรณ์ตรวจวัดประเภท Linear Voltage Displacement Transducers (LVDT) ติดตั้งที่ปลายพื้นทั้งสองฝั่ง โดยต่อเข้ากับชุดประมวลผล (Data Logger) เพื่ออ่านค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) กับระยะการแอ่นตัว (Deflection) และนำค่าจากกราฟไปวิเคราะห์หาโมเมนต์หน้าตัดที่เกิดขึ้นต่อไป

ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดการแอ่นตัวแนวตั้ง LVDT ซึ่งสามารถอ่านค่าละเอียดได้ถึง 0.001 มม. จำนวน 2 ชุด ที่บริเวณขอบพื้นสำหรับใช้คำนวณการแอ่นตัวเฉลี่ย โดยการวัดการแอ่นตัวของคานการบันทึกค่าการแอ่นตัวจะทำการภายหลังการเพิ่มหรือลดช่วงน้ำหนักที่กระทำบนพื้นทดสอบ ทำการหาสีขาวบางๆเพื่อสะดวกต่อการสังเกตลักษณะรอยร้าวตลอดความยาวพื้นทดสอบเพื่อเป็นเส้นอ้างอิงตรวจสอบการทำมุมของรอยร้าวที่ขณะทดสอบ คณะวิจัยทำการวาดรูปแบบรอยร้าวขณะทดสอบ และภาพหลังวิบัติ พร้อมวัดความกว้างรอยร้าว ด้วย Crack Microscope ขณะทดสอบ



3. ผลการทดสอบ

3.1 น้ำหนักสูงสุดและรูปแบบการวิบัติ

น้ำหนักวิบัติและรูปแบบการวิบัติ แสดงในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า S-FRP-9 มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดเฉลี่ย 32.7 กิโลนิวตัน S-FRP-6 24.8 กิโลนิวตัน, S-FRP-4 16.9 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ซึ่ง S-FRP-4 จะเป็นการวิบัติแบบทันทีทันใดโดย FRP Ruture และ S-FRP-6, S-FRP-9 จะเป็นการวิบัติแบบ Concrete crushing รอยแตกร้าวมีความกว้างประมาณ 1.73 มม. การทดสอบในระยะที่ 1 พื้นสแลททดสอบ S-S-C ทดสอบจนวิบัติเนื่องจากเป็นตัวควบคุม ซึ่งมีพิกัดรอยร้าวแรกและแรงบิดประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 4.2 กิโลนิวตัน และ 1.1 กิโลนิวตันเมตร ตามลำดับ ในส่วนของพื้นสแลท S-S-6, S-S-9, S-FRP-4, S-FRP-6, S-FRP-9 ทดสอบที่ระดับความเสียหายรอยร้าวแรก (First Crack) ซึ่งมีค่าพิกัดรอยร้าวแรกใกล้เคียงกันโดยที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.70 กิโลนิวตัน (ตารางที่ 4)

สมการคำนวณโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ACI 440.1R ดังสมการที่ (2) และ (3) สำหรับคำนวณและใช้ค่าความเคียดในการเปรียบเทียบกำลังของตัวอย่างตามมาตรฐานการทดสอบคอนกรีต โดยตัวอย่างที่สามารถต้านทานกำลังได้ดีที่สุด คือ ตัวอย่าง S-FRP-6 และ S-FRP-9 แต่เนื่องจากทั้ง 2 ตัวอย่างรับกำลังได้ดี จึงเลือก S-FRP-6 มาใช้ในการวิเคราะห์และนำไปใช้ในการพัฒนาพื้นสแลทคอนกรีตอัจฉริยะ ดูดซับคลื่นไม่เป็นสนิม โดยวัสดุแห่งพอลิเมอร์เสริมแรงแทนเหล็กเสริม สำหรับพื้นคอกปศุสัตว์

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีประสิทธิภาพ

สรุปผลการทดสอบและผลการเปรียบเทียบดัชนีประสิทธิภาพ แสดงในตารางที่ 4 จากค่าเฉลี่ย S_e (Effective Pre-yield Stiffness) ของแผ่นทดสอบ S-S-C, S-S-6, S-S-9, S-FRP-4, S-FRP-6 และ S-FRP-9 มีค่าเท่ากับ 0.894, 0.695, 0.979, 1.270, 1.553 และ 1.742 กิโลนิวตันต่อ

ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบและผลการเปรียบเทียบดัชนีประสิทธิภาพ

Slat ID	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	P_u (kN)	Δ_{max} (mm)	$w @L/240$ (kg/m ²)	Failure Mode	S_e (kN/mm)	$S_e/S_{e.o}$	ζ (kN.mm)	ζ/ζ_o
S-S-C-I	4.0	4.6	15.7	15.67	30.2	796.1	SY	0.894	1.0	433	1.0
S-S-C-II	4.4	4.8	15.8	15.79	27.0	854.1	SY				
S-S-6-I	3.6	5.2	20.2	20.15	15.0	751.3	SY	0.695	0.777	351	0.811
S-S-6-II	3.5	4.9	19.1	19.13	20.1	685.4	SY				
S-S-9-I	3.1	3.1	35.0	34.95	21.5	1244.3	SY	0.979	1.095	419	0.968
S-S-9-II	3.1	3.2	24.0	24.02	22.2	1146.8	SY				
S-FRP-4-I	4.0	4.5	11.6	17.64	28.1	772.4	FR	1.270	1.421	269	0.621
S-FRP-4-II	4.3	4.7	5.2	16.19	7.9	746.0	FR				
S-FRP-6-I	3.5	5.2	23.9	24.08	33.4	859.4	CC	1.553	1.737	511	1.180
S-FRP-6-II	3.6	5.3	17.7	25.66	29.2	817.2	CC				
S-FRP-9-I	4.0	6.5	26.0	31.29	36.4	1278.6	CC	1.742	1.948	789	1.822
S-FRP-9-II	4.3	7.4	25.6	34.28	35.9	1086.1	CC				

Note: P_u คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด, S_e คือ ความแข็งแกร่งก่อนเกิดการคราก, ζ คือ การดูดซับพลังงาน, SY คือ เหล็กเกิดการคราก, FR คือ การแตกของเส้น FRP Rod, และ CC คือ การแตกของคอนกรีต

มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟจะพบว่า ค่าตัวอย่าง S-FRP-4 ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากเกิดการวิบัติเป็นแบบ FRP Rupture (FR) ส่วน S-FRP-6 และ S-FRP-9 เหมาะสมกับการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากเกิดการวิบัติแบบ Concrete Crushing (CC) และมีค่าอัตราส่วน $S_e/S_{e,o}$ มากกว่า 1 คิดเป็นร้อยละ 58 (1.737) และ 51 (1.948) ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบจากตัวควบคุม S-S-C ($S_{e,o}$)

ในส่วนของการเปรียบเทียบดัชนีการดูดซับพลังงาน (ζ) ของแผ่นทดสอบ S-S-6, S-S-9, S-FRP-4, S-FRP-6 และ S-FRP-9 มีค่าเท่ากับ 0.811, 0.968, 0.621, 1.180 และ 1.822 กิโลนิวตันมิลลิเมตร ตามลำดับ หามาจากพื้นที่ที่กราฟจะพบว่า ค่าตัวอย่าง S-FRP-4 ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากเกิดการวิบัติเป็นแบบ FRP Rupture (FR) ส่วน S-FRP-6 และ S-FRP-9 เหมาะสมกับการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากเกิดการวิบัติแบบ Concrete Crushing และมีค่าอัตราส่วน ζ/ζ_0 คิดเป็นร้อยละ 84 (1.18) และ 54 (1.822) ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบจากตัวควบคุม S-S-C (ζ_0)

ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า ตัวอย่าง S-FRP-6 และ S-FRP-9 จึงมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้งานจริงมากที่สุด แต่เนื่องจากการนำมาใช้งานจริงนั้นต้องคำนึงถึงคุณภาพและต้นทุนการผลิต จึงเลือกใช้ตัวอย่าง S-FRP-6 เพราะว่ามีประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักตามมาตรฐานคอกหมู [1] และใช้ขนาด FRP- ϕ 6 ซึ่งเล็กกว่า FRP- ϕ 9 ซึ่งพบว่า ต้นทุนการผลิตจึงถูกกว่า ดังนั้นจึงเสนอแนะการผลิต WU-eoSLAT โดยใช้วัสดุแห่งพอลิเมอร์เสริมแรง ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. พบว่า สามารถรับน้ำหนักได้ 400 กก./ตร.ม. จึงเหมาะสมที่สุดกับการใช้ปูคอกสำหรับแม่สุกร และลูกสุกร ในช่วงการเติบโตระยะต่าง ๆ ได้อย่างปลอดภัย

3.3 ผลการเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบ

การคำนวณประสิทธิภาพการรับน้ำหนักประลัยของหน้าตัดแผ่นสแลทคอนกรีตเสริมแรงด้วยแห่งพอลิเมอร์เสริมแรง (รูปที่ 10) ตามมาตรฐาน ACI-440.1R [14] ซึ่งกำหนดใช้ตัวคูณลดน้ำหนัก (ϕ_r) คำนวนจากปริมาณแห่ง

พอลิเมอร์เสริมแรงที่เสริมแรง ($\rho_f = \frac{Af}{bd}$) ปริมาณวัสดุเสริมแรงที่ภาวะสมดุล (ρ_{fb}) ซึ่งจะสะท้อนถึงรูปแบบการวิบัติ ดังสมการที่ (1)

$$\phi_r = \begin{cases} 0.55 & \text{for } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0.3 + 0.25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{for } \rho_{fb} < \rho_f < 1.4\rho_{fb} \\ 0.65 & \text{for } \rho_f \geq 1.4\rho_{fb} \end{cases} \quad (1)$$

ดังนั้น เมื่อทราบรูปแบบการวิบัติของหน้าตัด ค่าโมเมนต์ประลัยขอหน้าตัดสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (2)

กรณี (i) หน้าตัดวิบัติแบบคอนกรีตแตก (Concrete Crushing)

$$\phi_r M_n = \phi_r A_s f_{fu} (d - 0.5\beta_1 c_b) \quad (2)$$

กรณี (ii) หน้าตัดวิบัติแบบตันที่ทันใด (FRP Rupture) ดังสมการที่ (3)

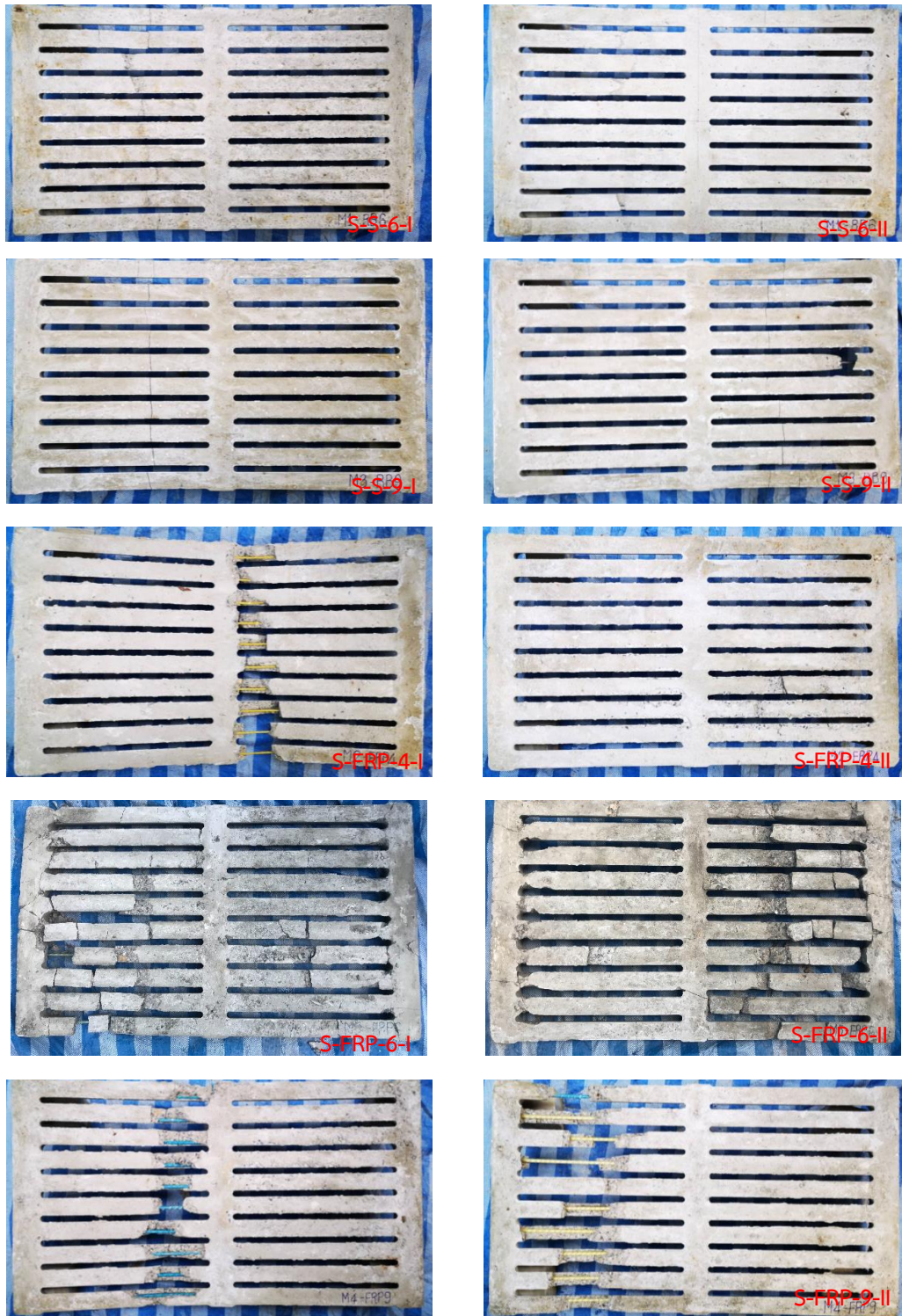
$$\phi_r M_n = \phi_r \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_{ff}}{f'_c}\right) bd^2 \quad (3)$$

โดยที่แนวแกนสะเทินสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$c_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d \quad (4)$$

3.4 แบบจำลอง Concrete Damage Plasticity Model

ในแบบจำลองคอนกรีตได้กำหนดคุณสมบัติเป็นคอนกรีตเสริมวัสดุเสริมแรงกลาสไฟเบอร์ (GFRP Rebar) วัสดุเสริมแรงกลาสไฟเบอร์ผลิตขึ้นมาจากเส้นใยกลาสไฟเบอร์จำนวนมากที่ผ่านขบวนการดึงขึ้นรูป และเคลือบผิวด้วยเม็ดทราย เพื่อทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตได้อย่างดี วัสดุเสริมแรงกลาสไฟเบอร์ ประกอบด้วยเส้นใยกลาสไฟเบอร์ที่ทนแรงดึงสูง ที่สามารถแสดงพฤติกรรมการตอบสนองได้ ทั้งในช่วงที่เป็นเชิงเส้นและในช่วงที่ไม่เชิงเส้น แบบจำลองความเสียหาย เชิงพลาสติกของคอนกรีต (Concrete



รูปที่ 10 รูปแบบการวิบัติของแผ่นทดสอบ เสริมแรงด้วยเหล็กและแท่งพอลิเมอร์เสริมแรง

สุพชัย ทิพย์ภักดี และคณะ, “นวัตกรรมแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปจากเศษคอนกรีตย่อยเสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมแรง สำหรับพื้นคอกปศุสัตว์.”

Damage Plasticity; CDP) โดยมีค่าพารามิเตอร์ แสดงใน ตารางที่ 5

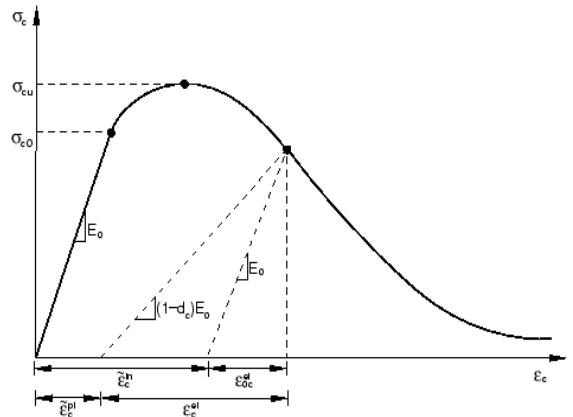
ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ใน CDP Model

E	ν	ψ	ε	σ	K_c	μ
28661	0.2	40	0.1	1.17	2/3	0.001

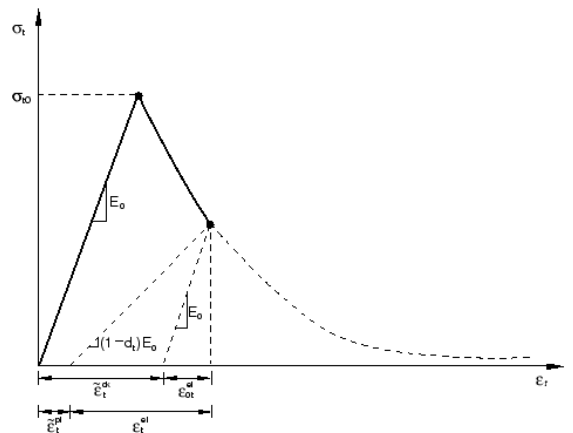
หมายเหตุ: E คือ Young's Modulus, ν คือ Poisson's Ratio, ψ คือ Dilation Angle, ε คือ Eccentricity, σ คือ Ratio of the strength in the biaxial state to the strength in the uniaxial state, K_c คือ Plastic Yield Surface Parameters, μ คือ Viscosity

จากตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ CDP ใน โปรแกรม Abaqus ประกอบไปด้วย E คือ Young's Modulus, ν คือ Poisson's Ratio, ψ คือ Dilation Angle, ε คือ Eccentricity, σ คือ Ratio of the strength in the biaxial state to the strength in the uniaxial state, K_c คือ Plastic Yield Surface Parameters, μ คือ Viscosity นำมาใช้เพื่อกำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีต ภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง พฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด เป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's Law) ซึ่งความสัมพันธ์ จะมี ลักษณะเชิงเส้น ที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดในช่วงนี้ เป็นไป ตามคำแนะนำของ ACI 318-19 [19] หรือ $0.45 f_c'$ ส่วนในช่วง ไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลอง CDP ใน Abaqus Library [12] กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อน และหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหาย เชิงพลาสติกที่เลือกใช้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความเสียหาย หรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตได้ใน รูปของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (Stiffness Degradation) ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำของแรงอัด ดังรูปที่ 11 และ แรงดึง ดังรูปที่ 12

จากผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดจาก แบบจำลองคอมพิวเตอร์ของตัวอย่าง S-FRP-6-1 ดังรูปที่ 13 พบว่า รูปแบบและขนาดของรอยร้าวมีความใกล้เคียงกับ ตัวอย่างที่ทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีค่าความกว้าง ของรอยร้าวเท่ากับ 1.73 มม. ค่า Stress ในแนวราบมีค่า

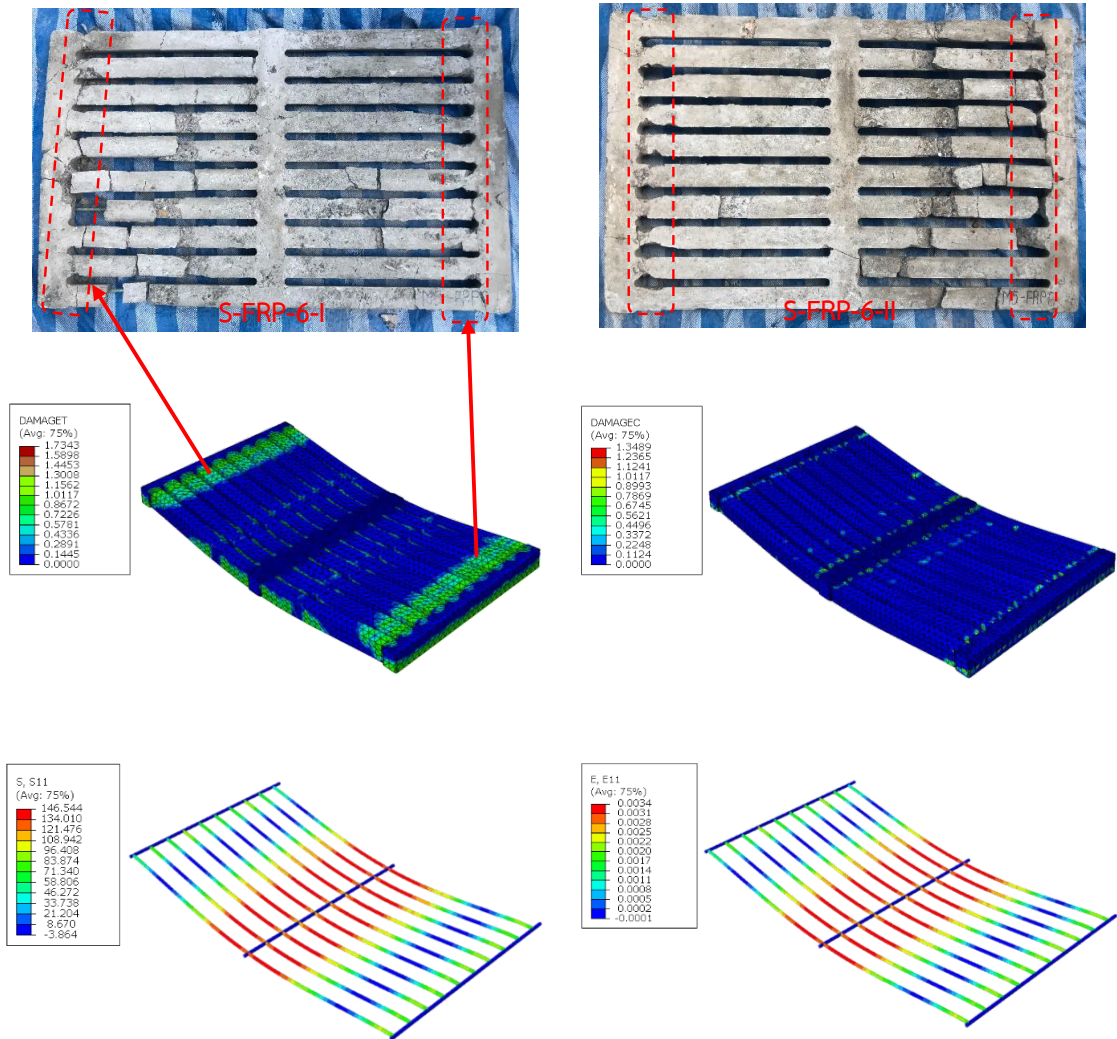


รูปที่ 11 รูปแสดงพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้ การกระทำของแรงอัด [12]

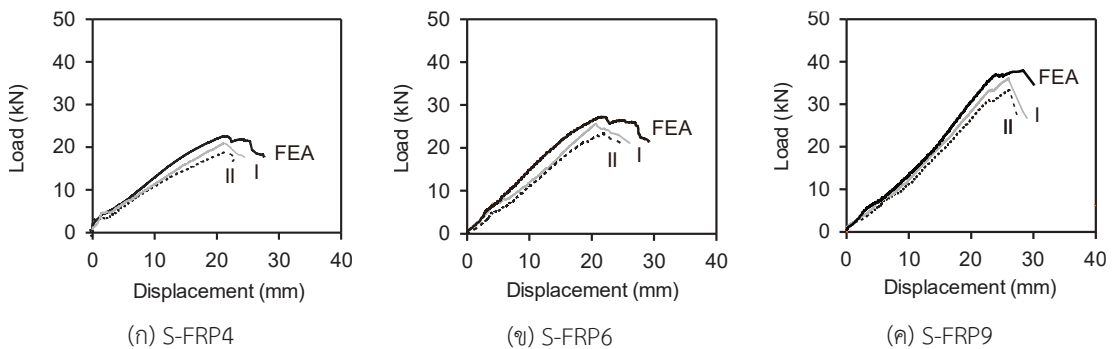


รูปที่ 12 รูปแสดงพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้ การกระทำของแรงดึง [12]

เท่ากับ 146.54 เมกะปาสคาล และค่า Strain ในแนวราบ เท่ากับ 0.0034 ในส่วนของผลการเปรียบเทียบ Load Deflection จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 14 พบว่า ตัวอย่าง S-FRP-9 Load สูงสุดมีค่าประมาณ 40 กิโลนิวตัน และตัวอย่าง S-FRP-4 มี Load ต่ำสุดประมาณ 20 กิโลนิวตัน ตารางที่ 6 แสดง ผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัด ประลัยของตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีต ที่มีขนาดการเสริมแท่ง พอลิเมอร์เสริมแรงต่าง ๆ กัน โดยมีผลจากการคำนวณตาม มาตรฐาน ACI-440.1R และผลการการวิเคราะห์แบบจำลอง



รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของตัวอย่าง S-FRP-6-1



รูปที่ 14 ผลการเปรียบเทียบ Load-deflection จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ไฟไนท์อิลิเมนต์พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบประมาณร้อยละ 20 และเมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ใช้การจำลองการวิบัติของคอนกรีตแบบ Concrete Damage Plasticity Model พบว่า ผลการทำนายโมเมนต์ดัดสูงสุดใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยผลการคลาดเคลื่อนจากทั้งสองตัวอย่าง ประมาณร้อยละ 5-10 เนื่องจาก ความไม่แน่นอนของระยะหุ้มและคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งมีความแปรปรวน จากการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ ในแต่ละส่วนผสม ดังนั้น จึงใช้ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดคอนกรีตในการวิเคราะห์แบบจำลองของคอนกรีตแบบ Concrete Damage Plasticity Model

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดหน้าตัด

Slat ID	โมเมนต์สูงสุด (kN.m)		
	EXP.	ACI 440.1R	FEA.
S-FRP-4-I	0.209	0.86	0.239
S-FRP-4-II	0.210		
S-FRP-6-I	0.286	1.94	0.312
S-FRP-6-II	0.289		
S-FRP-9-I	0.407	3.80	0.461
S-FRP-9-II	0.409		

หมายเหตุ: EXP คือ ผลจากการทดสอบ ACI 440.1R คือ มาตรฐานการทดสอบ FEA คือ ผลการเปรียบเทียบจากแบบจำลองไฟไนท์อิลิเมนต์

4. สรุป

โครงการวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมนวัตกรรมการแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปจากเศษคอนกรีตย่อยเสริมแรงด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมแรง WU-ecoSLAT สำหรับพื้นคอกปศุสัตว์ ซึ่งมีผลสรุปดังนี้

1) การใช้วัสดุมวลรวมจากเศษวัสดุคอนกรีต สามารถออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปเสริมแรงด้วยวัสดุคอมโพสิต ที่รับน้ำหนักมากกว่า 2 เท่าเทียบกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในท้องตลาดที่ขนาดเดียวกัน

2) ผลการออกแบบแผ่นพื้นสำเร็จรูป WU-ecoSLAT ให้ความสามารถในการรับน้ำหนักที่สูงกว่าประเภทที่จำหน่ายในท้องตลาด และมีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพแวดล้อม ที่เสี่ยง

ต่อการเกิดสนิมเหล็ก เช่น พื้นคอกปศุสัตว์ จากการชะล้างทำความสะอาดของโรงเลี้ยง

3) การทำนายค่าโมเมนต์ดัดหน้าตัดจากสมการ ACI-440.1R สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปเสริมแรงด้วยวัสดุคอมโพสิต ให้ค่าที่ต่ำกว่ากับผลการทดสอบร้อยละ 20

4) การทำนายค่าโมเมนต์ดัดหน้าตัดจากแบบจำลองที่ใช้การจำลองการวิบัติของคอนกรีตแบบ Concrete Damage Plasticity Model สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปเสริมแรงด้วยวัสดุคอมโพสิต ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจาก Pre-Talent Mobility ประจำปี 2564 ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ นายคิพจน์ ศานุปงศ์ นางสาวเวณี ฤกษ์สโมสร และนางสาววิศรุตดา ฤกษ์สโมสร ในการเตรียมชุดเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] *Medium and Small-sized Farms*. China Standard Press, GB/T17824.3-1999H, 1999.
- [2] Q. Ling “The slatted floor system in modern pig farms,” *Consultant of Breeding Technology*, vol. 11, pp. 38-39, 2002.
- [3] Q. Chen, X. Wang and C. Wang “The technology of production and new design of building,” *Intensive Pig Farms*. *Swine Production*, no. 3, pp. 34-35, 1998.
- [4] A. Nanni, “North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: Principles, applications and unresolved issues,” *Construction and Building Materials*, vol. 17, no. 6-7, pp. 439-446, 2003.



- [5] *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15)*, ACI Committee 440, 2015.
- [6] T. Imjai, R. Garcia, M. Guadagnini, and K. Pilakoutas, "Strength degradation in curved fiber-reinforced polymer (FRP) bars used as concrete reinforcement," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 8, pp. 24–29, 2020.
- [7] E. Gudonis, E. Timinskas, V. Gribniak, G. Kaklauskas, A. K. Arnautov, and V. Tamulenas, "FRP reinforcement for concrete structures: state-of-the-art review of application and design," *Engineering Structures and Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 147–158, 2013.
- [8] X. Koufteros, M. Vonderembse, and W. Doll, "Concurrent engineering and its consequences," *Journal of Operations Management*, vol. 19, no. 1, pp. 97–115, 2001.
- [9] R. Sacks, C. M. Eastman, and G. Lee, "Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete," *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 3, pp. 291–312, 2004.
- [10] L. Huang "Development on plastic slatted floors for livestock buildings," *Agricultural and Food Machinery*, no. 1, pp. 32–33, 1994.
- [11] L. Xu, Z. Li, S. Li, and F. Tang, "A decision support system for product design in concurrent engineering," *Decision Support Systems*, vol. 42, no. 4, pp. 2029–2042, 2007.
- [12] ABAQUS. (2014). FEA software and User's Manual version 6.14. Hibbitt, karlsson Sorensen Inc., Rhode Island. USA. [Online]. Available: <http://www.abaqus.com>
- [13] P. Kanhakorn, W. Rerksamosorn, W. Rerksamosorn, N. Inmontien, S. Tippakdee, T. Imjai, M. Setkit, and C. Wattanapanich "Estimation of shear behaviour for recycled aggregate concrete using digital image correlation (WU-DIC)," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 4, 2023.
- [14] *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*, ACI 440.1R-15, 2015.
- [15] C. R. Braam, J. J. M. H. Ketelaars, and M. C. J. Smits, "Effects of floor design and floor cleaning on ammonia emission from cubicle houses for dairy cows," *Netherlands Journal of Agricultural Science*, vol. 45, no. 1, 49–64, 1997.
- [16] Q. Chen, "Improvement of faeces cleaning and suitable equipments for pig house," *Animal Science and Medicine*, 1, 35, 2005.
- [17] T. Imjai, and S. Tippakdee, "Development of eco-friendly slatted floors (WU-ecSLAT) for livestock buildings in intensive pig farms," Pre-TM mobility. Final report, Walailak University, vol. 15, 2001 (in Thai).
- [18] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C39/C39M-18, 2001.
- [19] *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*, ACI 318-19, 2019.