



การผลิตแผ่นปูพื้นสนามจากเศษยางล้อรถยนต์และขยะพอลิสไตรีน

วิบูลย์พงศ์ บริบูรณ์ สาริศา ประเสริฐธำ ฐานิดา พลวงศ์ตระกูล และ สมเจตน์ พ็ชรพันธ์*

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 31 ตุลาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 28 มกราคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 31 มกราคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกและโฟมพอลิสไตรีนมาใช้เป็นสารเชื่อมประสานสำหรับการผลิตแผ่นปูพื้นสนามจากเศษยางล้อรถยนต์ เพื่อทดแทนการใช้สารเชื่อมประสานที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อย ปริมาณสารเชื่อมประสาน รวมถึงความหนาและความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัด สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ จากผลการทดสอบเบื้องต้น พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยเท่ากับ 75 ต่อ 25 เมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมประสานเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ทุกกรณี นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Autodesk Fusion 360 ในการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของแผ่นปูพื้นสนาม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง อีกทั้งยังถูกนำมาใช้ในการออกแบบแผ่นปูพื้นสนามที่มีลักษณะแนวเสริมแรงในรูปแบบที่แตกต่างกัน จากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง และจากผลการศึกษาแนวทางการออกแบบแนวเสริมแรงของแผ่นปูพื้นสนามที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ขึ้นอยู่กับรูปแบบ ความกว้าง และความสูงของแนวเสริมแรงที่ใช้สำหรับแผ่นปูพื้นสนาม ผลสำเร็จเบื้องต้นที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางที่สำคัญในการใช้ประโยชน์และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะพอลิสไตรีนและยางล้อรถยนต์ต่อไป

คำสำคัญ: ขยะพอลิสไตรีน; สารเชื่อมประสาน; เศษยางล้อรถยนต์; แผ่นปูพื้นสนาม; โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม



Floor Mat produced from Tire Crumb Rubber and Polystyrene Wastes

Wiboonpong Boriburana, Sarisa Prasertlum, Thanida Pholwongtrakul and
Somjate Patcharaphun*

Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

Received: 31 October 2024; Revised: 28 January 2025; Accepted: 31 January 2025

Online Published: 22 April 2025

Abstract: The objective of this work is to study the feasibility of using the disposal of polystyrene packaging plastic and foam as a binding agent for the floor mats, which is produced from recycled tire crumb rubber to replace commercial-grade binders. The influence of tire crumb rubber/aggregate ratio, binder content, bulk density, and product thickness on compressive strength, impact resistance, and water permeability are the main interesting factors. The preliminary results show that the best mechanical properties of tire crumb rubber floor mat can be obtained by using a crumb rubber/aggregate ratio of 75/25 mixed with 5.0 %V/V binder and the bulk density of floor mat is 0.9 g/cm³. Considering the water permeability, all the tire crumb rubber mat floors produced in this work are water - permeable. In this work, the computer program Autodesk Fusion 360 is utilized to design and analyze the strength of floor mats, and a comparison between the numerical and experimental results is carried out. Moreover, the various designs of rib patterns are examined. Good agreements between numerical and experimental results are found. For design purposes, to gain the highest strength-to-weight ratio, it is suggested that the rib pattern, rib width (W), and rib height (H) are important factors. The success of this work shows the high feasibility of utilizing polystyrene waste as a binding material to reclaim plastic wastes and tire rubbers and to reduce environmental problems.

Keywords: Polystyrene waste; Binder; Tire crumb rubber; Floor mat; Computer aided engineering program



1. บทนำ

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกถูกผลิตออกมาใช้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความสะดวกในการใช้งานและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่นๆ [1-2] อย่างไรก็ตามผลกระทบหรือปัญหาที่เกิดจากปริมาณการใช้พลาสติกที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ที่มีประมาณ 70% ของขยะพลาสติกทั้งหมด และขยะจากโฟม (Expanded Polystyrene, EPS) ที่มากกว่า 90% [3-5] เนื่องจากยังไม่มีการจัดการหรือกำจัดอย่างถูกวิธี รวมถึงใช้เวลาในการย่อยสลายหลายร้อยปี [6] จากผลการสำรวจแสดงให้เห็นว่าในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยมีขยะพลาสติกมากถึง 2.7 ล้านตันต่อปี หรือประมาณ 7,000 ตันต่อวัน ซึ่งกระบวนการในการกำจัดขยะพลาสติกที่นิยมใช้กันทั่วไป คือ การเผาทำลายและการฝังกลบ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งสภาพอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฝุ่น PM 2.5 และสภาพดินรวมถึงน้ำบาดาลซึ่งปนเปื้อนไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นอกจากนี้ปัญหาขยะที่ค้างและอุดตันตามท่อระบายน้ำยังเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดน้ำท่วมขังตามเมืองหลวงที่สำคัญของประเทศ

ยางล้อรถเป็นขยะอีกประเภทหนึ่งที่พบเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลก ส่งผลให้ขยะยางล้อรถมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การจัดการกับขยะยางก่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากยางเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมเซต (Thermosets) ที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) ผ่านปฏิกิริยาคัลคาไนซ์เซชัน (Vulcanization)

จึงไม่สามารถนำยางไปหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ [7] อีกทั้งกระบวนการย่อยสลายยางตามธรรมชาติใช้เวลานานนับร้อยปี การจัดการหรือกำจัดขยะยางล้อรถด้วยวิธีการที่ไม่เหมาะสมก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม อุบัติภัยจากไฟไหม้ของกองขยะยางล้อรถ ซึ่งการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดสารไดออกซินและฟูนิพิษที่เป็นอันตรายต่อคนและสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปการกำจัดขยะยางอย่างถูกวิธีต้องทำให้ขยะยางกลับมามีประโยชน์หรือใช้งานได้อีกครั้ง อาจอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์เติมหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ก็ได้ ในทางปฏิบัติแล้วการรีไซเคิลขยะยางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมบางประเภท และการนำไปผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) เพื่อให้ได้ส่วนประกอบดั้งเดิมของผลิตภัณฑ์นั้นกลับคืนมา [8-10] เป็นต้น

จากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการนำวัสดุยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์รวมถึงขยะพลาสติกมาผลิตเป็นแผ่นปูพื้นสนาม สุกชัชย [11] ได้พัฒนาบล็อกยางปูพื้นที่ผลิตจากยางธรรมชาติและยาง EPDM (Ethylene Propylene Diene Rubber) เหลือทิ้งโดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป บล็อกยางปูพื้นประกอบด้วยสองชั้น คือส่วนฐานรองรับซึ่งทำจากยางธรรมชาติชนิดยางskim (Skim Rubber) ผสมกับผงซีลีอียไม้อย่างพาราและไซยาง EPDM ซึ่งเหลือทิ้งจากฉนวนหุ้มท่อแอร์เป็นชั้นด้านบน จากผลการทดลองพบว่าสมบัติการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ในขณะที่สมบัติความต้านทานแรงฉีกขาด สมบัติการกระแทกกระดอนของ



บล็อกยางปูพื้นมีแนวโน้มลดลง วิหาร และ กิตติพงษ์ [12] ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์กระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษผงขยะพลาสติก EVA (Ethylene Vinyl Acetate) ในปริมาณต่างๆ กัน ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง แล้วอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 150°C จากผลการทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน ASTM พบว่ากระเบื้องยางธรรมชาติผสมผงพลาสติก EVA ในอัตราส่วน 10 phr (Part per Hundred Rubber) มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำไปปูพื้นผนังอาคาร เนื่องจากมีค่าความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการสึกหรอที่ดี ในขณะที่ความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลง กิตติพงษ์ และ ประชุม [13] พัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขวดพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่เหลือทิ้งจากการบริโภคจากผลการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ว่าขวดพลาสติก PET แบบสีและแบบใส มีสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน เมื่อนำไปบดย่อยเป็นเศษพลาสติกและผสมลงในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยลดการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ความร้อนที่สะสมบนพื้นผิว ลดต้นทุนการผลิต ช่วยลดปัญหาขยะพลาสติก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เพื่อเป็นการลดปัญหาขยะพลาสติกพอลิสไตรีนและโฟมพอลิสไตรีน รวมถึงขยะจากยางล้อรถ ซึ่งเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากและยังไม่ได้มีการกำจัดอย่างถูกวิธี ทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกนำขยะบรรจุภัณฑ์พอลิสไตรีนและเศษยางรถยนต์ (Tire Crumb Rubber, TCR) มาผลิตเป็นแผ่นปูพื้นสนาม โดยใช้หินย่อย

(Aggregate, Agg) เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcing Material) เพื่อให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะบรรจุภัณฑ์ PS และ EPS มาใช้เป็นสารเชื่อมประสาน (Binder) โดยวิธีการละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม เพื่อผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิตระหว่างเศษยางล้อรถยนต์และหินย่อยสำหรับการผลิตแผ่นปูพื้นสนาม และได้ดำเนินการทดสอบสมบัติเชิงกลในด้านความสามารถในการรับแรงอัดและแรงกระแทกรวมถึงสมบัติการซึมผ่านของน้ำ (Water Permeability) เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกและโฟมจากพอลิสไตรีน รวมถึงเศษยางล้อรถยนต์ในอนาคตต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

2.1 เศษยางล้อรถยนต์ที่ผ่านการบดย่อยและหินย่อย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4 และ 5 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) และ (b)

2.2 ก้อนบรรจุภัณฑ์ PS และ EPS ดังรูปที่ 1 (c)

2.3 สารละลายโทลูอีน (Toluene) เกรดการค้าจากบริษัท Sense

2.4 เครื่อง Shredder รุ่น SA030 ของบริษัท Nissuikako และเครื่อง Powderizer รุ่น SM100 ของบริษัท Retsch

2.5 เครื่อง Viscometer รุ่น RV-2M ของบริษัท W&J Instrument สำหรับการทดสอบความหนืดของสารเชื่อมประสานที่ผลิตจากขยะ PS และ EPS เมื่อละลายในโทลูอีน



รูปที่ 1 (a) เศษยางล้อยืดที่ผ่านการบดย่อย (b) หินย่อย และ (c) บรรจุภัณฑ์ PS และ EPS

2.6 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน-เย็น ของบริษัท EN mach และแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป ขนาด 126 x 126 mm ที่มีขนาดความหนา 15 25 และ 35 mm ตามลำดับ

2.7 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รุ่น H50KS ของบริษัท Hounsfield ใช้สำหรับการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงอัด (ASTM D695) ที่ความเร็วในการกด 1 mm/min กำหนดแรงกด (Compressive Force) ไม่เกิน 40,000 N จนแผ่นปูพื้นสนามเกิดความเสียหาย โดยใช้จำนวนแผ่นชิ้นงานสำหรับการทดสอบ 3 ตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไข

2.8 เครื่อง Falling Mass Impact Tester รุ่น QC637 ของบริษัท Comotech สำหรับการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก (ASTM D5628) ของแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้

2.9 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านน้ำของแผ่นปูพื้นสนาม โดยเติมน้ำในปริมาตรเท่ากับ

550 cm³ ที่ด้านบนของแผ่นปูพื้นสนาม และจับเวลาจนกระทั่งน้ำได้ไหลซึมผ่านแผ่นปูพื้นสนามจนหมด

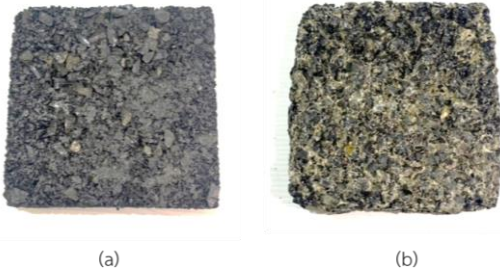
2.10 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Autodesk Fusion 360 สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของแผ่นปูสนาม

การทดลองเริ่มจากการบดย่อยขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติก PS และ EPS โดยใช้เครื่อง Shredder และ Powderizer เพื่อลดขนาดของขยะ PS และ EPS ดังแสดงในรูปที่ 2 (a) และ (b) นอกจากนี้เศษ PS ภายหลังจากผ่านการลดขนาดด้วยเครื่อง Shredder ซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ด (Flake) จะถูกนำไปบดย่อยให้เป็นผงโดยใช้เครื่อง Powderizer ดังแสดงในรูป 2 (c) เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายในสารละลายโทลูอีน จากนั้นนำผง PS และเศษ EPS ไปละลายในโทลูอีน ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.325 %W/V และทดสอบความหนืดโดยใช้เครื่อง Viscometer ที่ความเร็วรอบการหมุน 30 rpm จากผลการวิเคราะห์ พบว่า PS และ EPS ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.325 % W/V มีความหนืดประมาณ 1016 mPa.s ซึ่งเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นปูพื้นสนาม

ทำการอัดขึ้นรูปแผ่นปูพื้นสนามที่ใช้ PS และ EPS เป็นสารเชื่อมประสาน โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 120°C เป็นเวลา 20 min ภายใต้งี้อุ่นแบบต่างๆ (แสดงในตารางที่ 1) เพื่อระเหยโทลูอีนออก (จุดเดือดโทลูอีน 110°C) จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาอัดขึ้นรูปเย็นที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 15 min เพื่อให้สารเชื่อมประสานแข็งตัวก่อนนำออกจากแม่พิมพ์ รูปที่ 3 แสดงแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้จากสารเชื่อมประสาน PS และ EPS ตามลำดับ



รูปที่ 2 (a) ขยะ PS (b) EPS ภายหลังจากการลดขนาดด้วยเครื่อง Shredder และ (c) PS ภายหลังจากการบดให้เป็นผงด้วยเครื่อง Powderizer

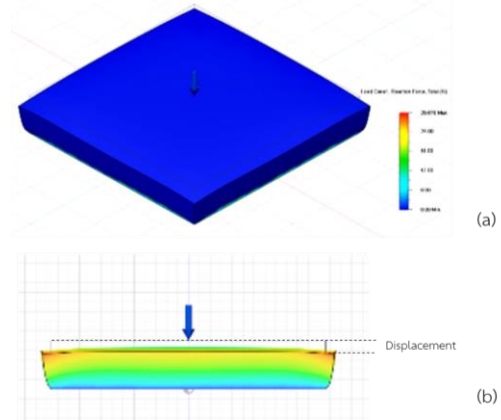


รูปที่ 3 แผ่นปูพื้นสนามที่ใช้สารเชื่อมประสานจาก (a) PS และ (b) EPS

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Autodesk Fusion 360 ถูกนำมาใช้ในการออกแบบแผ่นปูพื้นสนามขนาด 126x126 mm ที่ความหนา 15 25 และ 35 mm ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงที่ได้โดยกำหนดให้แรงกระทำ (Load) คงที่เท่ากับ 40,000 N ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงค่าแรงต้าน (Reaction force) และระยะยุบตัว (Displacement) ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4

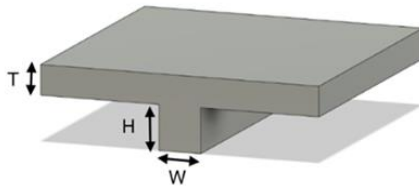
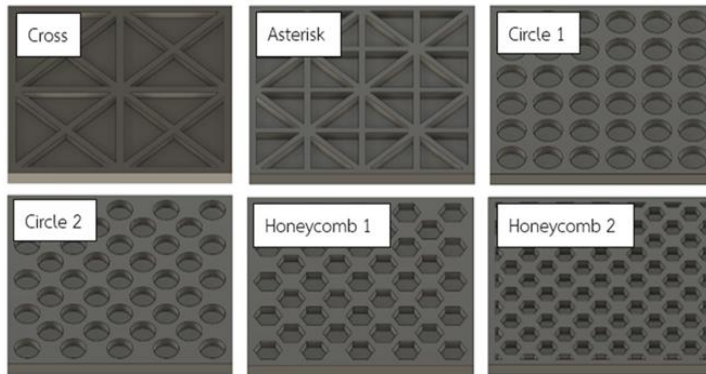
ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการผลิตแผ่นปูพื้นสนามที่ใช้ PS และ EPS เป็นสารเชื่อมประสาน

Parameter studies	
Binder (%V/V)	3 / 5 / 7
TCR: Agg (%V/V)	50:50 / 75:25 / 25:75
Thickness (mm)	15 / 25 / 35
Bulk density (g/cm ³)	0.50 / 0.70 / 0.90



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ Reaction force และ Displacement ที่ได้จากโปรแกรม Fusion 360

นอกจากนี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ยังถูกนำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงหรือระยะยุบตัวสูงสุด (Max Displacement) เมื่อเทียบกับน้ำหนักสำหรับแผ่นปูพื้นสนามขนาด 400x400 mm² ความหนา 25 mm ของแผ่นปูพื้นสนามที่มีลักษณะแนวเสริมแรงต่างๆ กัน ซึ่งได้แก่ รูปแบบกากบาท (Cross) รูปแบบดอกจัน (Asterisk) รูปแบบวงกลม (Circle) และรูปแบบรังผึ้ง (Honeycomb) ที่มีขนาดต่างๆ กัน ดังรูปที่ 5



W คือ ความกว้างของแนวเสริมแรง (Width)
T คือ ความหนาผนังชั้นงาน (Wall thickness)
H คือ ความสูงของแนวเสริมแรง (Height)

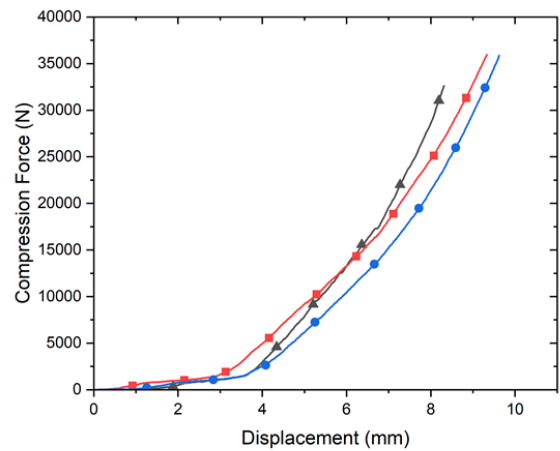
รูปที่ 5 ลักษณะแนวเสริมแรงแบบต่างๆ และสัดส่วนของ W T และ H ที่ใช้ในการออกแบบแนวเสริมแรง

ภายใต้เงื่อนไข W T และ H ต่างๆ กัน เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบผลิตภัณฑ์แผ่นปูพื้นสนามที่มีความสามารถในการรับแรงและน้ำหนักที่เหมาะสมต่อไป

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงอัด

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบแรงอัด (Compressive Force) ซึ่งได้จากแผ่นปูพื้นสนามทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่มีอัตราส่วนระหว่างเศษขยาล้อยกยนต์ต่อหินย่อยที่ 50:50 ที่ความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 15 mm และปริมาณสารเชื่อมประสาน PS ที่อัตราส่วน 5 %V/V โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะยุบตัวที่เกิดขึ้น จากผลการทดสอบโดยทั่วไป พบว่าแรงที่ใช้ในการอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะยุบตัวที่



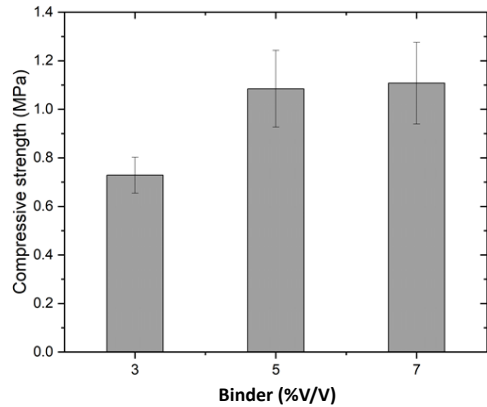
รูปที่ 6 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้และระยะยุบตัวของแผ่นปูพื้นสนาม



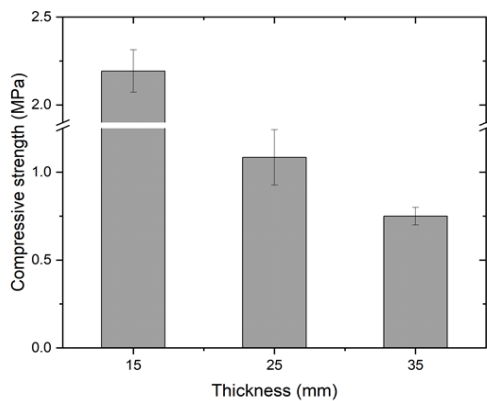
บทความวิจัย

หากพิจารณาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมประสาน PS ที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามตังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อใช้อัตราส่วนเศษยางล้อยนต์ต่อหินย่อยที่ 50:50 และความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm โดยเปรียบเทียบปริมาณสารเชื่อมประสานในอัตราส่วนเท่ากับ 3 5 และ 7 %V/V ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าแผ่นปูพื้นสนามที่ผสมสารเชื่อมประสาน PS ในอัตราส่วน 3 %V/V ให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดต่ำที่สุด เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมประสานที่ไม่เพียงพอต่อการยึดเกาะ ในขณะที่แผ่นปูพื้นสนามที่ผสมสารเชื่อมประสานในอัตราส่วน 5 และ 7 %V/V ให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดที่ไม่แตกต่างกัน รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของความหนามีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนาม เมื่อใช้อัตราส่วนเศษยางล้อยนต์ต่อหินย่อยที่ 50:50 และผสมสารเชื่อมประสาน PS ในอัตราส่วน 5 %V/V โดยทำการเปรียบเทียบที่ความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 15 25 และ 35 mm ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 8 พบว่าแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาเท่ากับ 15 mm มีความต้านทานต่อแรงอัดสูงที่สุด และแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาเท่ากับ 25 และ 35 mm มีความต้านทานต่อแรงอัดลดลงตามลำดับ

ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่มีปริมาณสารเชื่อมประสาน PS ในอัตราส่วน 5 %V/V และความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm แสดงในรูปที่ 9 โดยทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อยนต์ต่อหินย่อย (TCR:Agg) ที่ 25:75 50:50 และ 75:25 จากผลการทดสอบพบว่า เมื่ออัตราส่วนของเศษยางล้อยนต์



รูปที่ 7 สมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ผสมสารเชื่อมประสาน PS ในปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 8 สมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่มีความหนาต่างๆ กัน

เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความต้านทานต่อแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อยนต์ต่อหินย่อยที่ 75:25 มีสมบัติความต้านทานต่อแรงอัดที่สูงที่สุด ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุมาจากความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างเศษยาง หินย่อย และสารเชื่อมประสาน PS กล่าวคือ สารเชื่อมประสาน PS มีความเข้ากันได้กับเศษยางมากกว่าหินย่อย โดยพิจารณาจากค่า

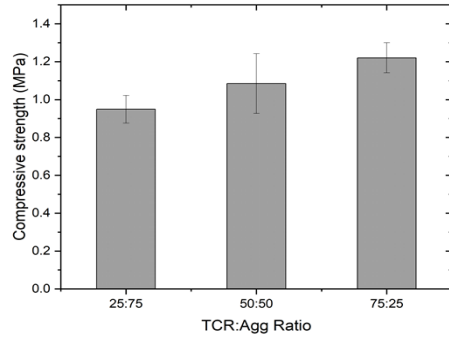


บทความวิจัย

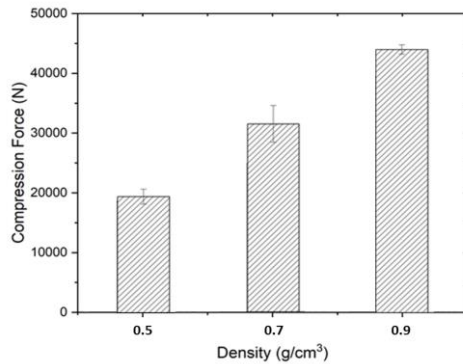
Surface Energy หรือ Polarity ที่ผิว [14] จึงส่งผลให้สารเชื่อมประสาน PS และเศษยางล้อสามารถยึดเกาะกัน (Adhesion) ได้ดี และสามารถส่งถ่ายแรงที่มากกระทำ (Stress Transfer) ได้ดีกว่า

รูปที่ 10 แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตจากสารเชื่อมประสาน PS และ EPS ในปริมาณ 5 %V/V อัตราส่วนเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยที่ 75:25 และความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm จากผลการทดสอบพบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดที่ได้จากสารเชื่อมประสานทั้ง 2 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม แผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตจากสารเชื่อมประสาน EPS มีค่าต่ำกว่า PS เล็กน้อย ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากฟองอากาศที่อยู่ภายในสารเชื่อมประสานซึ่งมาจากรูปทรงภายในเม็ดโฟม EPS

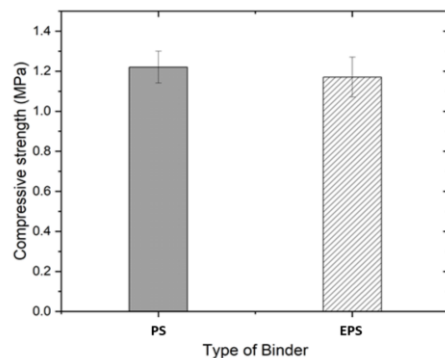
หากพิจารณาอิทธิพลของความหนาแน่นที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่มีความหนา 25 mm เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อต่อหินย่อยเท่ากับ 75:25 และใช้ปริมาณสารเชื่อมประสาน 5 %V/V ที่ความหนาแน่น 0.5 0.7 และ 0.9 g/cm³ จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาแน่น 0.9 g/cm³ ที่ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงอัดสูงที่สุดและสามารถรับแรงอัดได้มากกว่า 40000 N หรือ 4 ตัน โดยยังไม่ได้รับความเสียหาย



รูปที่ 9 สมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามเมื่อใช้ TCR:Agg ต่างๆ กัน



รูปที่ 10 สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนาม เมื่อใช้สารเชื่อมประสาน PS และ EPS



รูปที่ 11 ความสามารถในการรับแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนาม ที่ความหนาแน่นต่างๆ กัน

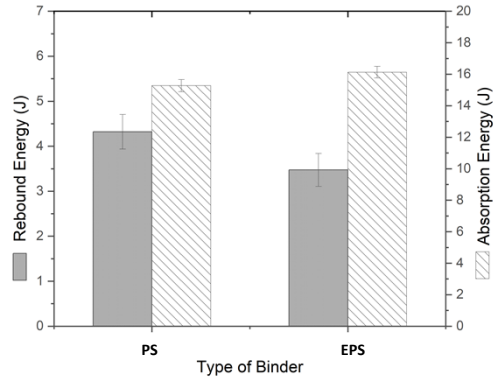


3.2 ผลทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก

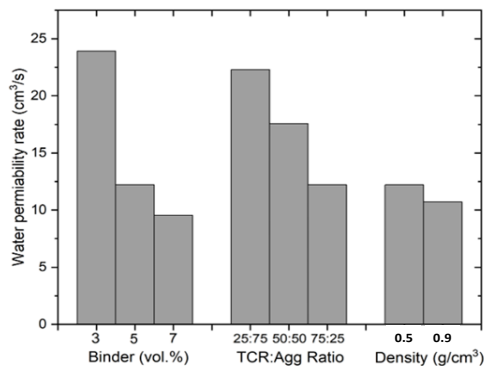
ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก ในรูปที่ 12 ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพลังงานการกระเด็นกระดอน (Rebound energy) และการดูดซับพลังงาน (Absorption energy) ของแผ่นปูพื้นสนามที่อัตราส่วนเศษยางล้อยนต์ต่อหินย่อยเท่ากับ 75:25 และความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm เมื่อใช้สารเชื่อมประสานจาก PS และ EPS ในอัตราส่วนเท่ากับ 5 % V/V ที่ความหนาแน่น 0.5 0.7 และ 0.9 g/cm³ ตามลำดับ โดยทำการทดสอบที่ความสูง 200 cm ใช้ลูกตุ้มเหล็กน้ำหนัก 1,000 g หรือที่พลังงานเท่ากับ 19.6 J ซึ่งเป็นพลังงานศักย์ที่สูงที่สุดของเครื่องทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่า แผ่นปูพื้นสนามที่ใช้ PS และ EPS เป็นสารเชื่อมประสานที่ความหนาแน่นเท่ากับ 0.5 และ 0.7 g/cm³ เกิดความเสียหายในทุกกรณี ในขณะที่แผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาแน่นเท่ากับ 0.9 g/cm³ ไม่เกิดความเสียหายแต่อย่างใด ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบแผ่นปูพื้นสนามที่ขึ้นรูปโดยใช้สารเชื่อมประสานจาก PS และ EPS ที่ความหนาแน่น 0.9 g/cm³ เท่านั้น พบว่าแผ่นปูพื้นสนามที่ขึ้นรูปโดยใช้สารเชื่อมประสานจาก EPS มีความสามารถในการดูดซับพลังงานดีกว่าและมีสมบัติการกระเด็นกระดอนต่ำกว่าแผ่นปูพื้นสนามที่ใช้สารเชื่อมประสานจาก PS ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากรูพรุนที่เกิดจากฟองอากาศภายในเม็ด EPS ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านน้ำ

จากผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของน้ำของแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้ ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่า น้ำสามารถซึมผ่านแผ่นปูพื้นสนามได้หมดในทุก



รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์การกระเด็นกระดอนและการดูดซับพลังงานของแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตจากสารเชื่อมประสาน PS และ EPS



รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นปูพื้นสนามที่เงื่อนไขในการผลิตต่างๆ กัน

กรณี โดยอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมประสาน สัดส่วนของเศษยางล้อยนต์ และความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้หากมีการใช้ขนาดของเศษยางล้อยนต์และ

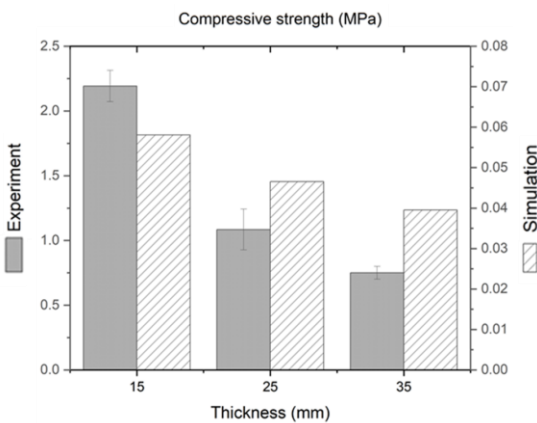


บทความวิจัย

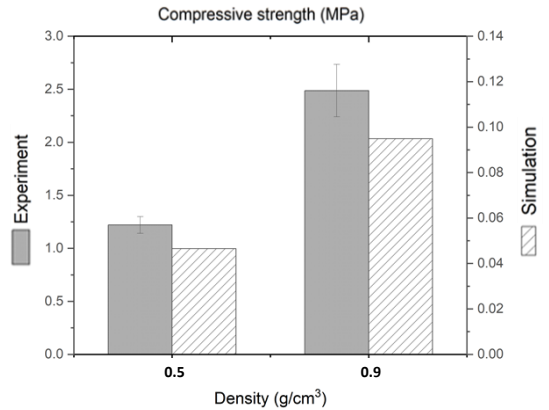
หिनยอยที่เล็กลงอาจส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ลดลงได้เช่นกัน

3.4 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแผ่นปูพื้นสนามโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อปรับเปลี่ยนความหนา และความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนาม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบพบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง กล่าวคือ การเพิ่มความหนาของแผ่นปูพื้นสนาม ส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดมีค่าลดลง ในขณะที่การเพิ่มความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 14 ผลการเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาต่างๆ กัน ซึ่งได้จากการทดสอบจริงและโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 15 ผลการเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาแน่นต่างๆ กัน ซึ่งได้จากการทดสอบจริงและโปรแกรมคอมพิวเตอร์

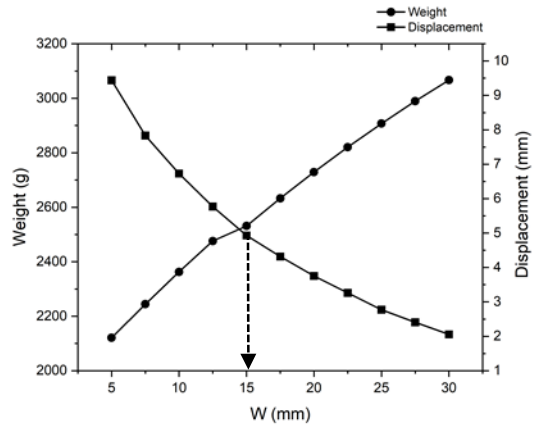
อย่างไรก็ตามหากพิจารณาผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการทดสอบและการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือในการทดสอบจริงแผ่นปูพื้นสนามถูกอัดที่บริเวณผิวด้านบนด้วยความเร็วคงที่ (Constant speed) แล้วจึงทำการตรวจวัดแรงกระทำ (Force, F) ที่เกิดขึ้นจากชุด Load cell ด้านบนของเครื่อง UTM ในขณะที่การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำการกดอัดที่บริเวณผิวด้านบนของแผ่นปูพื้นสนามด้วยแรงคงที่จนแผ่นปูพื้นสนามเกิดการยุบตัวลงไป แต่ไม่สามารถควบคุมความเร็วในการกดอัดได้ ซึ่งในความเป็นจริงนั้นวัสดุทุกชนิดมีสมบัติที่ขึ้นอยู่ กับเวลา (Time-Dependent) [15] หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งหากใช้ความเร็วในการกดอัดที่สูงขึ้นค่าแรงที่ตรวจวัดได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน



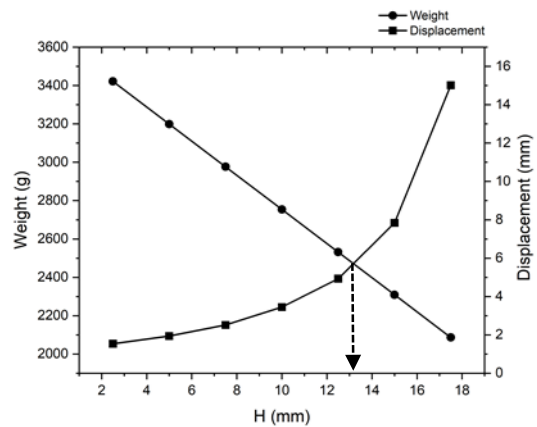
3.5 ผลการวิเคราะห์การออกแบบแผ่นปูพื้นสนามที่มีแนวเสริมแรงแบบต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพทั้งในด้านความแข็งแรงรวมถึงน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนาม โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบและขนาดแนวเสริมแรงแบบกากบาท (Cross) แบบดอกจัน (Asterisk) แบบวงกลม (Circle) แบบที่ 1 และ 2 และแบบรังผึ้ง (Honeycomb) แบบที่ 1 และ 2 ที่มีต่อระยะยวบตัวสูงสุดและน้ำหนัก สำหรับแผ่นปูพื้นสนามขนาด 400x400 mm ที่ความหนาเท่ากับ 25 mm ภายใต้เงื่อนไขความกว้างของแนวเสริมแรง (Width, W) ความหนาของแผ่นปูพื้นสนาม (Thickness, T) และความสูงของแนวเสริมแรง (Height, H) โดยรูปที่ 16 และ 17 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ระยะยวบตัวและน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามที่ใช้รูปแบบแนวเสริมแรงแบบกากบาท โดยทำการกำหนดให้ T และ H คงที่เท่ากับ 12.5 mm และทำการปรับเปลี่ยนขนาดความกว้างของแนวเส้นเสริมแรงในช่วงระหว่าง 5 ถึง 30 mm แสดงดังรูปที่ 16 จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มขนาด W ทำให้น้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ระยะยวบตัวมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาที่จุดตัดของกราฟทั้งสองเส้น พบว่าค่า W ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 15 mm จากนั้นจึงนำค่า W=15 mm ไปใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าความสูงของแนวเส้นเสริมแรง (Height, H) ในช่วงระหว่าง 2.5 ถึง 17.5 mm ดังแสดงในภาพที่ 17 ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อ H เพิ่มสูงขึ้น

ส่งผลให้น้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ระยะยวบตัวเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยค่า H ที่เหมาะสม ซึ่งได้จากจุดตัดระหว่างกราฟทั้งสองเส้น คือ 13 mm



รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์ค่า W ของแนวเส้นเสริมแรงแบบกากบาทที่ให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงดีที่สุด



รูปที่ 17 ผลการวิเคราะห์ค่า H ของแนวเส้นเสริมแรงแบบกากบาทที่ให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงดีที่สุด



ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดของแนวเส้นเสริมแรงแบบต่างๆ ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อคำนึงถึงระยะยุบตัวเทียบกับน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนาม และเมื่อพิจารณาสมบัติการต้านทานแรงอัดต่อน้ำหนัก (Specific Compressive Strength) ของแผ่นปูพื้นสนามเมื่อใช้แนวเสริมแรงต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งวิเคราะห์ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าแนวเสริมแรงแบบกากบาท ให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดเมื่อเทียบกับน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามที่ดีที่สุด

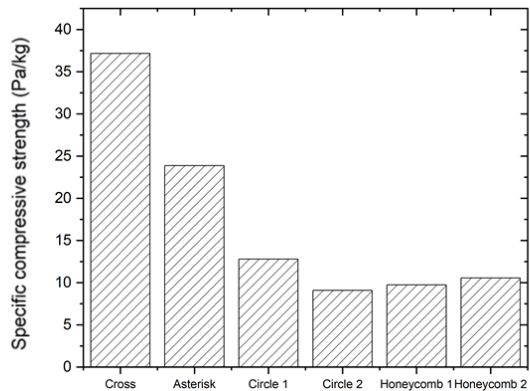
4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกและโฟมพอลิสไตรีน มาใช้เป็นสารเชื่อมประสานสำหรับการผลิตแผ่นปูพื้นจากเศษยางล้อรถยนต์ โดยใช้หินย่อยเป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อทดแทนการใช้สารเชื่อมประสานที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อย และปริมาณสารเชื่อมประสาน รวมถึงความหนาและความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความหนาแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm ที่อัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยเท่ากับ 75:25 และปริมาณสารเชื่อมประสานร้อยละ 5 %V/V ให้ประสิทธิภาพโดยรวมเหมาะสมที่สุด
2. การเพิ่มความหนาแน่นให้กับแผ่นปูพื้นสนามที่เท่ากับ 0.9 g/cm³ ส่งผลให้สมบัติการต้านทาน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของแนวเส้นเสริมแรงแบบต่างๆ ที่ให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ดีที่สุด

Patterns							
Cross		Asterisk		Circle		Honeycomb	
W (mm)	H (mm)	W (mm)	H (mm)	φ # 1 (mm)	φ # 2 (mm)	Side length # 1 (mm)	Side length # 2 (mm)
15.0	13.0	12.5	15.0	35.94	35.52	19.0	18.0



รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานแรงอัดต่อน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามที่มีแนวเสริมแรงแบบต่างๆ ซึ่งได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ต่อแรงอัดและแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยสามารถรับแรงอัดได้มากถึง 4 ตัน โดยไม่เกิดความเสียหาย

3. แผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ในทุกกรณี โดยอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสาน สัดส่วนของเศษยางล้อ และความหนาแน่น



ของแผ่นปูพื้นสนาม ทั้งนี้หากมีการใช้ขนาดของเศษยางล้อรถยนต์และหินย่อยที่เล็กลงอาจส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ลดลงได้เช่นกัน

4. ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Autodesk Fusion 360 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง กล่าวคือ การเพิ่มความหนาของแผ่นปูพื้นสนามส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดลดลง ในขณะที่การเพิ่มความหนาแน่น ส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น

5. จากผลการศึกษาการออกแบบแนวเสริมแรงของแผ่นปูพื้นสนาม พบว่า รูปแบบแนวเส้นเสริมแรงแบบกากบาท ให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนาม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางในการออกแบบผลิตภัณฑ์แผ่นปูพื้นสนามที่มีน้ำหนักเบา ยังคงมีความสามารถในการรับแรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม และสามารถลดต้นทุนด้านวัสดุที่ใช้ในการผลิต

6. ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้ จะเป็นแนวทางที่สำคัญในการใช้ประโยชน์จากขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกและโฟมพอลิสไตรีน รวมถึงเศษยางล้อรถยนต์ เพื่อการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับทุนอุดหนุนและเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Brydson, *Plastics materials*, 7th Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.
- [2] K.G. Budinski and M.K. Budinski, *Engineering material: Properties and selection*, 6th Ed., Prentice Hall International Inc., NJ, 1999.
- [3] J. Maris, S. Bourdon, J.M. Brossard, L. Cauret, L. Fontaine and V. Montembault, *Mechanical recycling: compatibilization of mixed thermoplastic wastes*, *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 147, 245-266.
- [4] Z. Zhongkun, Z. Denghua, S. Wentao, W. Linlin, Z. Jianbo, M. Hui, C. Lu, Y. Baohuai, Q. Yusheng and W. Changming, *Study on mechanical properties of expanded polystyrene*, *American Journal of Civil Engineering*, 2018, 6(1), 11-15.
- [5] A. Salisu and S. Maigari, *Polystyrene and its recycling: A review*, *Materials Science and Technology Society of Nigeria (MSN) Kaduna State, Proceeding*, 2021, 195-203.
- [6] J. Scheirs, *Polymer recycling: science, technology and applications*, John Wiley and Sons, NY, 1998.
- [7] J.E. Mark, B. Erman and F.R. Eirich, *Science and Technology of Rubber*, 2nd Ed., Academic Press, NY, 1994.
- [8] H. Chittella, L.W. Yoon, S. Ramarad and Z.W. Lai, *Rubber waste management: A review on*



- methods, mechanism, and prospects, *Polymer Degradation and Stability*, 2021, 194, 109761.
- [9] A. Singh, S.N. Spak, E.A. Stone, J. Downard, R.L. Bullard, M. Pooley, P.A. Kostle, M.W. Mainprize, M.D. Wichman, T.M. Peters, D. Beardsley and C.O. Stanier, Uncontrolled combustion of shredded tires in a landfill—Part 2: population exposure, public health response, and an air quality index for urban fires, *Atmospheric Environment*, 2015, 104, 273–283.
- [10] S. Ramarad, M. Khalid, C.T. Ratnam, A.L. Chuah and W. Rashmi, Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future, *Progress in Materials Science*, 2015, 72, 100-140.
- [11] S. Kaewjang, Development of floor blocks from natural rubber and waste EPDM, Master's Thesis, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, 2009. (in Thai)
- [12] W. Deepanya and K. Suweero, Development of low cost natural rubber floor tile mixed with fine ethylene vinyl acetate plastic waste, Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2018. (in Thai)
- [13] K. Suweero and P. Khamput, Development of interlocking concrete paving block product mixed with colored polyethylene terephthalate plastic bottle from post-consumer waste, *Journal of Engineering RMUTT*, 2020, 18, 81-89. (in Thai)
- [14] A.R. Tarrer and V. Wagh, The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC, 1991.
- [15] W.F. Smith, *Principles of Materials Science and Engineering*, 3rd Ed., McGraw-Hill series in Material Science and Engineering, NY, 1996.