รีไซเคิลเศษกระจกเทมเปอร์เพื่อทดแทนหินธรรมชาติในงานพื้นเทอร์ราซโซ

Recycling of Tempered Glass to Replace Natural Aggregate in Terrazzo Flooring

วริสรา เลิศไพฑูรย์พันธ์[1]*, และ โยธิน มัชฌิมาดิลก[2]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม2410/2 ถนนพหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม2410/2 ถนนพหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

*ผู้ติดต่อ: warisara.le@spu.ac.th, โทรศัพท์ 02-579-1111 ต่อ 2147

บทคัดย่อ

กระจกเทมเปอร์ หรือ กระจกนิรภัย (tempered glass หรือ safety glass) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้กับงานอาคารหลายประเภทด้วยกัน และกระจกที่แตกเสียหายแล้วจะถูกทิ้งเป็นขยะและถูกนำไปกำจัดโดยการฝังกลบในที่สุด เพราะปัจจุบันยังไม่มีการนำกระจกนิรภัยเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของกระจกนิรภัยที่มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงที่ทำให้กระจกหักงอประมาณ 1,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีความต้านแรงอัดสูงถึง 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีความแวววาวสวยงาม งานวิจัยนี้จึงได้นำเศษกระจกนิรภัยมาทดแทนหินเกล็ดเพื่อทำพื้นหินขัดและศึกษาผลกระทบของปริมาณเศษกระจกนิรภัยในการแทนที่หินเกล็ดต่อคุณสมบัติการรับแรงอัดของพื้นหินขัด โดยใช้เศษกระจกนิรภัยแทนหินเกล็ดในอัตราส่วนร้อยละ 60, 80 และ 100 ตามลำดับ จากนั้นหล่อตัวอย่างหินขัดเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 15×15× 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร และทดสอบคุณสมบัติของหินขัด คือค่าการรับกำลังอัด การทนการกัดกร่อนจากกรดและจากโซดาไฟ ผลทดสอบพบว่า หินขัดที่ผสมเศษกระจกนิรภัยมีค่าการรับกำลังอัดอยู่ในช่วง 148 – 204 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าค่าการรับกำลังอัดของหินขัดที่ผสมหินเกล็ดเพียงอย่างเดียว และยังทนการกัดกร่อนจากกรดและด่างได้

คำสำคัญ:เศษกระจกนิรภัย, หินขัดผสมเศษกระจก, รีไซเคิลกระจกนิรภัย

Abstract

Broken tempered glass is generally not recyclable which therefore is thrown away as garbage and finally is disposed of into landfills. The tensile strength and bending strength of the tempered glass are approximately 1,500 kilograms per square meter (ksc) and surface compressive strength must exceed 1,000 ksc. Moreover, it looks shiny, and thus this research used the tempered glass debris to replace flake stones for the terrazzo. Then, the effect of safety glass debris content in replacing stone flakes on compressive strength of the terrazzo was investigated. The amount of tempered glass debris to replace flake stone were 60, 80, and 100 percent. After

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

that, the terrazzo samples were made into a cube size 15 × 15 × 15 cubic centimeters and tested for the compressive strength and corrosion resistance from acids and caustic soda. The results showed that the compressive strength of terrazzo containing tempered glass debris ranged from 148 to 204 ksc which were higher than the terrazzo containing only flake stones, and also resistant to corrosion from hydrochloric acid and potassium hydroxide.

Keywords: Tempered Glass Waste, Terrazzo Containing Glass, Recycled Tempered Glass

1. บทนำ

ด้วยคุณสมบัติของกระจกเทมเปอร์ หรือกระจกนิรภัย (tempered glass หรือ safety glass) ที่มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และแรงที่ทำให้กระจกหักงอ (bending strength) ประมาณ 1,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รวมทั้งมีความต้านแรงอัด (surface compressive strength) สูงถึง 1,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงทนทานต่อแรงกระแทก แรงกด แรงอัด และเมื่อแตกจะมีอันตรายน้อยกว่ากระจกธรรมดา กระจกเทมเปอร์จึงเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้สำหรับบริเวณที่ต้องรับแรงกระแทกสูงหรือรับแรงลมสูง เช่น ผนังอาคารหรือผนังหน้าต่างที่ต้องรับแรงลมสูง ผนังกั้นระหว่างผู้ชมกับสนามแข่งกีฬาต่างๆ หรือ อาคารศูนย์การค้า ธนาคาร โชว์รูมรถ ที่อยู่บริเวณที่มีประชาชนเดินผ่านไปมาและมีโอกาสเดินชนหรือกระแทกกระจกกฎหมายก็กำหนดให้ใช้กระจกนิรภัย แต่ข้อเสียของกระจกเทมเปอร์คือจะไม่สามารถ ตัด เจาะ เจียร บาก ในภายหลังได้ ต้องกำหนดขนาดของแผ่น รวมทั้งระบุตำแหน่งและขนาดที่ต้องการเจาะก่อนนำไปอบ ดังนั้นการวัดพื้นที่ติดตั้งงานจึงต้องวัดอย่างแม่นยำเป็นหน่วยมิลลิเมตร ซึ่งหากผลิตมาแล้วขนาดไม่พอดีกับตำแหน่งที่จะนำไปติดตั้งก็จะเป็นการสูญเสีย นอกจากนี้กระจกเทมเปอร์ที่เกิดจากรื้อถอนเลิกใช้หรือแตกเสียหายจะกลายเป็นของที่ต้องทิ้ง ถึงแม้ขวดแก้วหรือภาชนะที่ทำจากแก้วส่วนใหญ่จะสามารถนำไปหลอมเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ แต่สำหรับกระจกเทมเปอร์นั้นในปัจจุบันยังไม่มีอุตสาหกรรมหลอมกระจกเทมเปอร์รีไซเคิล อีกทั้งไม่สามารถหลอมรวมกับแก้วธรรมดาได้เช่นกัน เพราะมีองค์ประกอบที่ต่างกันและจุดหลอมเหลวต่างกัน [1] หากไม่สามารถรีไซเคิลได้ ขยะประเภทกระจกเทมเปอร์ก็จะต้องถูกกำจัดโดยนำไปฝังกลบ เช่นเดียวกับวิธีการกำจัดเศษแก้วในหลายประเทศที่จะไม่นำขวดหรือภาชนะทำจากแก้วที่แตกเป็นชิ้นเข้าสู่กระบวนการหลอมแต่จะนำไปหลุมฝังกลบ ปัญหาความต้องการพื้นที่ฝังกลบที่เพิ่มมากขึ้นจึงเป็นความท้าทายด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมที่หลายประเทศกำลังเผชิญ [2]

ถึงแม้ว่าเศษแก้วจะไม่สามารถนำกลับไปหลอมเพื่อทำมาเป็นภาชนะได้ดังเดิมแต่ก็มีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาการนำเศษแก้วที่บดแล้วมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโดยใช้ทดแทนมวลรวมในการผสมคอนกรีตเพื่อการใช้งานหลากประเภท เช่น แอสฟัลต์คอนกรีต (asphalt concrete) พื้นทางและชั้นรองพื้นทางสำหรับงานถนน (base and subbase of roads) คอนกรีตมวลเบาเสริมเส้นใย (ultra-lightweight fibre reinforced concrete) คอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูล่า (cellular lightweight concrete) ทดแทนมวลรวมในมอร์ตาร์ (mortar) นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัสดุประสานทดแทนซีเมนต์ (cementitious material) การนำเศษแก้วมาทำเป็นวัสดุก่อสร้างจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมหลายประการด้วยกัน คือ ช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ลดความต้องการพื้นที่หลุมฝังกลบ และเป็นการส่งเสริมการจัดการขยะอย่างยั่งยืน [3-7] เศษแก้วบด

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

ที่งานวิจัยส่วนมากพิจารณานำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างนั้นจะเป็นเศษแก้วหรือเศษกระจกธรรมดา แต่ยังไม่ค่อยมีนักวิจัยให้ความสนใจใช้ประโยชน์จากเศษกระจกเทมเปอร์

Siddique et al.[5] แสดงให้เห็นว่าเศษกระจกเทมเปอร์สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนทรายในการผสมคอนกรีตได้ หากใช้ทดแทนทรายในปริมาณร้อยละ 5 -20 จะทำให้การรับกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นได้ถึง ร้อยละ 119 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเศษกระจกเทมเปอร์ ในประเทศไทยก็ได้นำเศษกระจกเทมเปอร์ที่ใช้ขนาบข้างบันไดเลื่อนที่ชำรุดแล้ว มาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตในการสร้างอาคารโรงอาหารของโรงเรียนแห่งหนึ่งในจังหวัดเชียงใหม่ [8] อย่างไรก็ตาม การทดแทนส่วนผสมในคอนกรีตด้วยเศษแก้วหรือเศษกระจกเทมเปอร์นั้น อาจยังต้องการงานวิจัยสนับสนุนอีกมากถึงข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากคอนกรีตมักถูกใช้ในงานโครงสร้างหลัก (primary structure) หรือโครงสร้างรอง (secondary structure) ที่ต้องมีคุณสมบัติทางกลไม่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด แต่หากนำเศษกระจกเทมเปอร์ไปใช้เป็นส่วนผสมในองค์ประกอบอื่นที่ไม่ได้เป็นงานหมวดโครงสร้างและไม่ได้ทำหน้าที่รับแรง เช่นนำไปใช้ในงานพื้นหินขัด (terrazzo) ซึ่งเป็นงานในหมวดสถาปัตยกรรมที่ใช้เพื่อความสวยงาม ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ทำได้

ส่วนผสมหลักของงานพื้นหินขัดคือ ปูนซีเมนต์ขาว หินเกล็ด และสีผสมซีเมนต์ ซึ่งการคละหินเกล็ดให้มีทั้งขนาดเล็ก กลาง ใหญ่ เพื่อให้หินเกล็ดเล็กทำหน้าที่อุดประสานช่องว่างระหว่างหินเกล็ดกลางและเกล็ดใหญ่ พื้นหินขัดก็จะแข็งและทนทาน หินเกล็ดมีขนาดเฉลี่ย 3/8 นิ้ว (9.5 มิลลิเมตร.) นิยมใช้ในงานตกแต่งสวน ทางเท้า โรยก้นหลุม งานหล่อคอนกรีต งานหล่อท่อระบายน้ำ ถังส้วม งานผิวทางราดยาง เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และงานก่อสร้างอื่นๆ หากจะใช้หินเกล็ดสำหรับผลิตกระเบื้องหินขัดชั้นเดียว มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2600-2556) กำหนดว่าส่วนผสมของหินเกล็ดต้องมีขนาดเม็ดจากเล็กสุดจนถึง 6 มิลลิเมตรหรือเล็กสุดจนถึง 12 มิลลิเมตรมวลผสมเปนหินเกล็ดจากหินออนหรือหินเกล็ดทั่วไป และ/หรืออาจมีวัสดุอื่นที่เหมาะสมก็ได หรือทั้งสองอยางผสมกัน มวลผสมตองแข็งแกรง และทนทาน ปราศจากสารเจือปนที่จะทำให้ความทนทานตอการสึกกร่อนของชั้นผิวหนาตองเสียไป และตองมีรูปรางและสวนคละของหินเกล็ดที่เหมาะสม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาพัฒนาการนำเศษกระจกเทมเปอร์ที่เป็นขยะจากการก่อสร้างและรื้อถอน (construction and demolition waste) มาบดเพื่อใช้ทดแทนหินเกล็ดในการผลิตพื้นหินขัด ซึ่งมุ่งหวังจะแทนที่หินเกล็ดให้ได้มากที่สุด เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้หินเกล็ดจากธรรมชาติ ลดปริมาณขยะที่จะต้องนำไปกำจัดยังหลุมฝังกลบ และพัฒนาวัสดุก่อสร้างใหม่ ทั้งนี้สมมติฐานของการศึกษาคือการใช้เศษกระจกเทมเปอร์บดแทนที่หินเกล็ดในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลให้การรับแรงอัดของพื้นหินขัดเพิ่มขึ้นได้ เพราะกระจกเทมเปอร์ถูกผลิตขึ้นจากการหลอมที่ความอุณหภูมิสูงให้มีความแข็งแรงสม่ำเสมอมากกว่าหินจากธรรมชาติมีช่องว่างพรุน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาพื้นเทอร์ราซโซโดยใช้เศษกระจกเทมเปอร์แทนที่หินเกล็ด

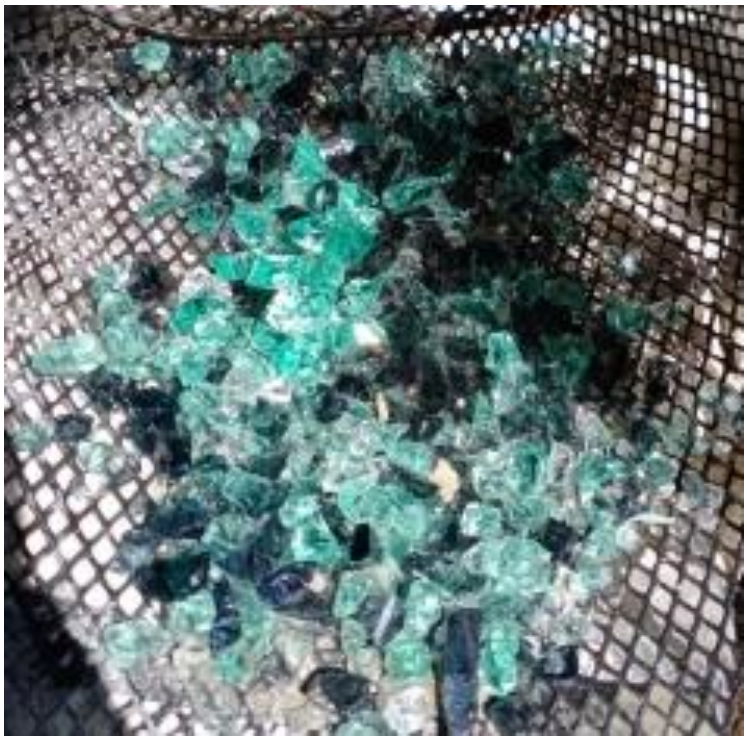
2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณเศษกระจกเทมเปอร์ในการแทนที่หินเกล็ดต่อคุณสมบัติการรับแรงอัดของพื้นเทอร์ราซโซ

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยประกอบไปด้วย

1. บดกระจกเทมเปอร์ให้มีขนาดเล็กและร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดขนาด งานวิจัยนี้เลือกใช้เศษกระจกที่มีขนาดประมาณ 5-10 มิลลิเมตร จึงร่อนผ่านตะแกรง 3/8” (9.53 มิลลิเมตร) และนำส่วนที่ลอดผ่านตะแกรงมาร่อนคัดขนาดอีกครั้งด้วยตะแกรง No.4 (4.75 มิลลิเมตร) ส่วนที่ติดค้างตะบนแกรง No.4 จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสาเหตุที่ต้องคัดขนาดของเศษกระจกตามที่กล่าวมาแล้ว เพราะต้องการให้หินขัดที่ผลิตขึ้นมามีความสวยงาม ตามที่ Ling and Poon [9] ระบุว่าการใช้ขนาดเศษกระจกในช่วง 5-10 มิลลิเมตร จะเพิ่มความสวยงามให้กับงานมอร์ตาร์ผสมเศษแก้วที่ใช้ในงานสถาปัตยกรรมอย่างมาก



รูปที่ 1 เศษกระจกเทมเปอร์ที่คัดขนาดแล้ว

2. เตรียมส่วนผสมสำหรับทำชิ้นงานตัวอย่างพื้นหินขัดซึ่งประกอบไปด้วยชั้นพื้นคอนกรีตและชั้นผิวหินขัด ส่วนผสมของพื้นคอนกรีตคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทรายหยาบ หินขนาด 3/8” ส่วนผสมของชั้นผิวหินขัดคือ ปูนซีเมนต์ขาวสำหรับงานเทอร์ราซโซ หินเกล็ดขนาด 3/8” เศษกระจกเทมเปอร์ โดยออกแบบส่วนผสมของชั้นหินขัดให้มีส่วนผสมโดยน้ำหนักของปูนซิเมนต์ขาว 1 ส่วน ต่อหินเกล็ด 2 ส่วน เป็นตัวอย่างควบคุม และใช้เศษกระจกเทมเปอร์ทดแทนหินเกล็ดใน 3 สูตรที่แตกต่างกันคือ ทดแทนหินเกล็ดร้อยละ 60, 80 และ 100 ดังแสดงในตารางที่ 1

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

ตารางที่ 1 ปริมาณเศษกระจกเทมเปอร์ที่ใช้ทดแทนหินเกล็ดในก้อนตัวอย่าง

ชื่อที่ใช้เรียก	ปริมาณหินเกล็ด (ร้อยละ)	ปริมาณเศษกระจกเทมเปอร์ (ร้อยละ)
control	100	0
G60	40	60
G80	20	80
G100	0	100

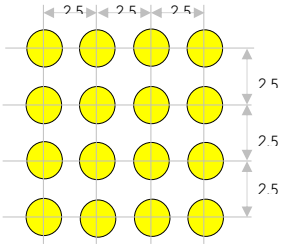
นำส่วนผสมที่ทำเป็นชั้นพื้นคอนกรีตมาผสมและเทลงในแบบหล่อลูกบาศก์ ขนาด 15 × 15 × 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้มีความหนา 13 เซนติเมตร ทิ้งไว้ให้แข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยคลุมด้วยพลาสติกเพื่อลดการสูญเสียน้ำ จากนั้นผสมส่วนที่เป็นชั้นผิวหินขัดเทลงบนชั้นพื้นคอนกรีต ซึ่งความหนาของชั้นผิวหินขัดที่ได้จะไม่น้อยกว่าข้อกำหนดการตรวจรับงานของงานพื้นหินขัดทั่วไปในประเทศไทย (1.3-1.8 เซนติเมตร) และไม่น้อยกว่าข้อกำหนดของ National Terrazzo and Mosaic Association, Inc. ของสหรัฐอเมริกา ที่กำหนดความหนาของชั้นหินขัดให้อยู่ระหว่าง 1 เซนติเมตร – 1 นิ้ว (ขึ้นกับประเภทของหินขัด) ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 7 วัน แล้วขัดผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2

3. เมื่อขัดผิวหน้าหินขัดแล้ว ทิ้งไว้อีก 7 วัน และ 21 วัน ตามลำดับ แล้วจึงทดสอบการรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ (เมื่อผิวหน้าหินขัดมีอายุ 14 วัน และ 28 วัน) ด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีค้อนกระแทก (Rebound Hammer หรือ Schmidt Hammer Test) ตามมาตรฐาน ASTM C805 ในการทดสอบชิ้นตัวอย่าง 1 ก้อน จะกำหนดจุดกระแทก 16 จุด ซึ่งแต่ละจุดต้องห่างกันอย่างน้อย 1 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้การกระแทกแบบกดลงในแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4 เพียงแบบเดียวเท่านั้นซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดจะได้จากการวัดการสะท้อนกลับของมวลน้ำหนักสปริง (spring-loaded mass) หลังจากใช้ค้อนกระแทกกับผิวของตัวอย่างที่ต้องทดสอบด้วยพลังงานที่กำหนด

(ก) (ข) (ค)

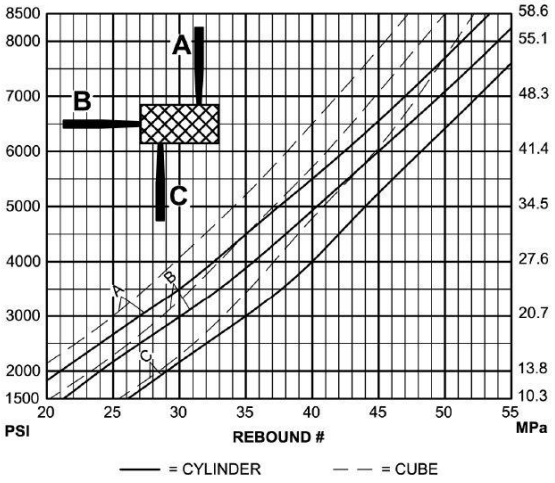
รูปที่ 2 การหล่อก้อนตัวอย่าง (ก) เทส่วนชั้นพื้นคอนกรีต (ข) เทชั้นผิวหินขัด (ค) ขัดเปิดผิวหน้าชั้นหินขัด

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”



รูปที่ 3 การกำหนดจุดกระแทกบนชิ้นตัวอย่าง **รูปที่** 4 กดค้อนกระแทกแบบกดลงในแนวดิ่ง

4. อ่านค่าการสะท้อนจากมาตรวัดของค้อนกระแทก โดยอ่านค่าเป็นจำนวนเต็ม และตัดค่าที่ต่างจากค่าเฉลี่ย ตามที่กำหนดไว้ใน มยผ.1502-51 ซึ่งให้เฉลี่ยค่าการกระแทกที่ทดสอบได้อย่างน้อย 10 ตำแหน่ง และตัดค่าการกระแทกที่มีค่าต่างจากค่าเฉลี่ย $\pm$ 6 และเฉลี่ยค่าที่เหลือใหม่ หากมีค่าตั้งแต่สามค่าขึ้นไปที่ต่างจากค่าเฉลี่ย $\pm$ 6 ให้ทดสอบค่าชุดใหม่ และนำค่าการกระแทกที่วัดได้ มาเทียบเป็นค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยคากำลังรับแรงอัดของชิ้นทดสอบจะสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธของคาสะท้อนกลับ (Rebound Number) กับ คากำลังรับแรงอัด ดังแสดงในรูปที่ 5 ในการทดสอบนี้กดด้วยรูปแบบกดลงแนวดิ่ง คือแบบ A และเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของชิ้นตัวอย่างที่ทดแทนหินเกล็ดด้วยเศษกระจกเทมเปอร์ในสัดส่วนต่างๆ



รูปที่ 5 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของค่าสะท้อนกลับ กับ ค่ากำลังรับแรงอัด
ที่มา : https://www.ndtjames.com/Manual_Rebound_Hammer_p/w-m.htm

5. ทดสอบความทนต่อการกัดกร่อนด้วยการแช่ชิ้นตัวอย่างในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 3 โดยปริมาตรและสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด 30 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าหินขัด

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

6. วิเคราะห์ความแตกต่างของค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างที่ทดแทนหินเกล็ดด้วยเศษกระจกเทมเปอร์ในสัดส่วนต่างๆโดยใช้ 1-Way ANOVA วิเคราะห์ความแปรปรวน (Variance) เนื่องจากมีเพียง 1 ปัจจัย(factor) ที่ถูกควบคุม

ตั้งสมมติฐาน H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$

H_1: มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ ไม่เท่ากัน

เมื่อ μ คือค่าเฉลี่ยของค่าการสะท้อนจากค้อนกระแทกของชิ้นตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเศษกระจกเทมเปอร์ในสัดส่วนต่างๆ

หาค่า F Statistic จากMS_B/MS_W

เมื่อ MS_B คือ Mean square between sample และ MS_W คือ Mean square within sample

4. ผลการวิจัย

เมื่อนำค่าการกระแทกที่วัดได้จากการกดค้อนกระแทกลงบนชิ้นตัวอย่างแต่ละก้อนเป็นจำนวน 16 ตำแหน่ง ไปหาค่าเฉลี่ยและตัดค่าที่ไม่เหมาะสมออก นำค่ากระแทกที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟเพื่อแปลผลเป็นค่าการรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่าง ได้ผลดังนี้ การรับกำลังอัดของชิ้นตัวอย่างพื้นหินขัดที่ใช้หินเกล็ดเพียงอย่างเดียว (control) ที่อายุ 14 วัน มีค่า 143 ksc เมื่อทดแทนหินเกล็ดด้วยเศษกระจกเทมเปอร์ร้อยละ 60 (ตัวอย่าง G60), 80 (ตัวอย่าง G80) และใช้เศษกระจกเทมเปอร์ทดแทนหินเกล็ดทั้งหมด (ตัวอย่าง G100) จะมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษกระจกเทมเปอร์ที่เพิ่มขึ้น เป็น 148, 153 และ 204 ksc ตามลำดับ เมื่อชิ้นตัวอย่างมีอายุ 28 วัน ทดสอบการรับกำลังอัดของ control, G60, G80, G100 ได้ผลเท่ากับ 170, 172, 174 และ 221 ksc ตามลำดับ ซึ่งผลสอดคล้องการรับกำลังอัดเมื่อชิ้นตัวอย่างมีอายุ 14 วัน คือ เมื่อเพิ่มเศษกระจกเทมเปอร์ในส่วนผสมจะส่งผลให้ค่าการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การรับกำลังอัดของก้อนตัวอย่าง ทดสอบเมื่ออายุ 14 วัน และ อายุ 28 วัน

ชื่อตัวอย่าง	หินเกล็ด (ร้อยละ)	เศษกระจกเทมเปอร์ (ร้อยละ)	การรับกำลังอัด อายุ 14 วัน (ksc)	การรับกำลังอัด อายุ 28 วัน (ksc)
control	100	0	143	170
G60	40	60	148	172
G80	20	80	153	174
G100	0	100	204	221

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

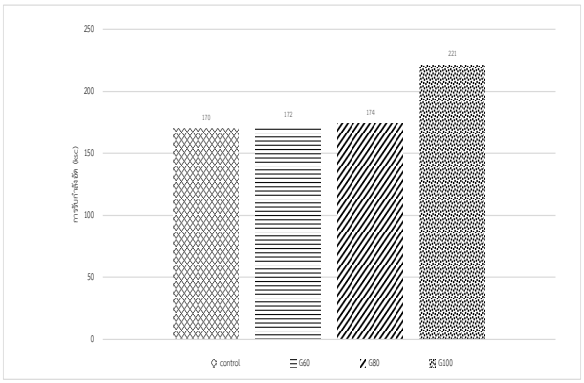
วิเคราะห์ความแตกต่างของค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่างทั้ง 4 คือ control, G60, G80 และ G100 ด้วยวิธี 1-Way ANOVA โดยกำหนดให้ค่าระดับนัยสำคัญ (significant level) α = 0.05โดยมีสมมติฐาน H_0 : μ_1 = μ_2 = μ_3 = μ_4และ H_1 : มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ ไม่เท่ากัน นำค่าการสะท้อนจากค้อนกระแทกคำนวณหาค่า F Statistic ได้เท่ากับ 3.24 เปรียบเทียบกับค่า F Critical จากตาราง (F-Table) ซึ่งเท่ากับ 2.87 เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่าค่า F Statistic มากกว่าค่า F Critical จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1ทำให้สรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยการการสะท้อนจากค้อนกระแทกของการออกแบบส่วนผสมทั้ง 4 วิธีมีอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ 0.05ซึ่ง ANOVA Table แสดงในตารางที่ 3 จึงต้องมีการทดสอบอีกครั้งเพื่อหาว่า ค่าเฉลี่ยคู่ใดที่แตกต่างกันและเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยการสะท้อนของ control กับ G100 พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 3 ANOVA Table

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	85.20	3	28.40	3.24	0.03	2.87
Within Groups	315.20	36	8.76			
Total	400.40	39				

นำค่าการรับกำลังอัดของชิ้นตัวอย่างทุกชนิด ที่อายุ 28 วันมาเปรียบเทียบกัน จะได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นว่าค่าการรับกำลังอัดของ control, G60 และ G80 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อใช้เศษกระจกเทมปอร์ทดแทนหินเกล็ดทั้งหมด (G100) จะทำให้ชิ้นตัวอย่างมีค่าการรับกำลังสูงขึ้นถึงร้อยละ 30

การทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรดและด่างที่ความเข้มข้นต่ำ โดยแช่ชิ้นตัวอย่างในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นพิจารณาด้วยสายตาเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในกรดและด่าง พบว่าชิ้นตัวอย่างทุกส่วนผสม (control, G60, G80 และ G100) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากแช่ในกรดและด่าง



รูปที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างพื้นหินขัดที่มีส่วนผสมต่างกัน เมื่ออายุ 28 วัน

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

5. อภิปรายและสรุปผล

เมื่อแทนที่หินเกล็ดในชั้นหินขัดด้วยเศษกระจกเทมเปอร์ในสัดส่วนต่างๆ และทดสอบการรับแรงอัด และการกัดกร่อนแล้ว สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เศษกระจกเทมเปอร์สามารถใช้ทดแทนหินเกล็ดในการทำชั้นพื้นหินขัดได้ และยังสามารถเพิ่มการรับแรงอัดให้กับพื้นหินขัดได้

2. สามารถทดแทนหินเกล็ดด้วยเศษกระจกเทมเปอร์ได้ถึงร้อยละ 100 (G100) ซึ่งจะส่งผลดีต่อการจัดการขยะก่อสร้างประเภทเศษกระจกเทมเปอร์ และลดการใช้วัตถุดิบที่เป็นทรัพยากรธรรมชาติ นอกจากนี้ยังเป็นการส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) เพราะสามารถนำขยะจากกระบวนการหนึ่งกลับมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่น

3. ส่วนผสม G100 รับแรงอัดได้สูงที่สุด ซึ่งอาจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ทำหินขัดได้ในอนาคตโดยไม่ต้องใช้หินเกล็ดเลย

4. ด้วยคุณสมบัติที่ทนการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง เป็นคุณสมบัติที่ไม่ได้ถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน สำหรับพื้นหินขัด แต่งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อเป็นข้อมูลในเบื้องต้นสำหรับการตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุทดแทนหินเกล็ดต่อไปในอนาคต

5. จากผลการวิเคราะห์ 1-Way ANOVA ยอมรับ H_1นั่นคือสรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของค่าการรับกำลังอัดจากส่วนผสมทั้ง 4 มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน จึงได้นำค่าเฉลี่ยการรับกำลังอัดของ control และ G100 ไปวิเคราะห์ความแตกต่าง ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่หากต้องการทราบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างคู่ใดแตกต่างกันอย่างไร อาจต้องใช้การเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparison test) ร่วมด้วย

6. ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยนี้ใช้การทดสอบการรับกำลังอัดด้วยวิธีค้อนกระแทก ซึ่งถึงแม้จะมีข้อดีคือสะดวก ใช้งานง่าย แต่มีข้อเสียอยู่หลายประการด้วยกัน และอาจส่งผลต่อผลการทดสอบที่ได้ เช่นใน มยผ. 1502-51 ระบุไว้ว่าประเภทของมวลรวมและปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ โดยทั่วไปแล้วค่าการสะท้อนของคอนกรีตที่มีมวลรวมเป็นหินปูน (Limestone) จะมีค่าน้อยกว่าค่าการสะท้อนของคอนกรีตที่มีมวลรวมเป็นหินแม่น้ำซึ่งมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากัน นอกจากนี้การใช้หินชนิดเดียวกันจากคนละแหล่งอาจส่งผลให้ค่าการสะท้อนของคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเท่ากันมีค่าแตกต่างกันได้ ด้วยข้อเสียเหล่านี้ หากใช้วิธีการทดสอบแบบทำลายด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) อาจหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดดังกล่าวได้ นอกจากนี้มีงานวิจัยหลายเรื่องได้แสดงถึงผลของขนาดของเศษแก้วที่ใช้เป็นมวลรวมในงานคอนกรีตมีผลต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Alkali-Silica Reaction; ASR) [5] จึงควรมีการศึกษาความแข็งแรงของพื้นหินขัดโดยใช้ขนาดของเศษกระจกเทมเปอร์แตกต่างกัน

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Afshinnia, K. and Rangaraju, P. R. (2015). Influence of Fineness of Ground Recycled Glass on Mitigation of Alkali–Silica Reaction in Mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 257–267.

[2] Ling, T. C., Poon, C. S., Wong, H. W. (2013). Management and Recycling of Waste Glass in Concrete Products: Current situations in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 70, 25– 31.

[3] ณัฏฐ์ มากุล, ประกาศิต โสไกร และ วรเทพ พิมสบาย. (2563). สมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูล่าร์ผสมเศษแก้วบดละเอียด. *วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 15(1), หน้าที่ 1-12.

[4] Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T. H. H, Kurmus, H., Arulrajah, A. and Horpibulsuk, S. (2017). Practical Recycling Applications of Crushed Waste Glass in Construction Materials: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 443-467.

[5] Siddique, I., Rauf, M., Khayam, S. U., Shams, M. A. and Faisal, H. (2018). Effect of Tempered Glass Fines in Concrete at Elevated Temperature. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 414 012001

[6] Lu, J. X. and Poon, C. H. (2018). Recycling of Waste Glass in Construction Materials. in de Brito, J. and Agrela, F (Eds). *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete* (153-167). Woodhead Publishing.

[7] Małek, M., Łasica, W., Jackowski, M. and Kadela, M. (2020). Effect of Waste Glass Addition as a Replacement for Fine Aggregate on Properties of Mortar. *Materials*, 13(3189), 1-19.

[8] ฐานเศรษฐกิจ. (2559). เศษกระจกนิรภัย สู่โรงอาหารรักษ์โลกอเนกประสงค์ ของ มิตซูบิชิ เอลเลเวเตอร์ เพื่อเด็กชนบท. *ฐานเศรษฐกิจ*. (1 - 3 ธันวาคม 2559). สืบค้นเมื่อ 25 มกราคม, 2564, จาก https://www.thansettakij.com/content/strategy/117124

[9] Ling, T.C. and Poon, C.S. (2011). Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes. Materials & Design, 32(5), pp. 2675–2684.

“บทความที่เผยแพร่เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบต่อผลกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”