



# อิทธิพลของเส้นใยแก้วและของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอย ชุมชนที่มีต่อกำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัด

เฉลิมพล วังสำเภา<sup>1,3</sup> สกล โพลลาด<sup>2,3</sup> พิมพ์ภัศ คำมาวงศ์<sup>3</sup> สุนันทา สี่มาจารย์<sup>3</sup> อารยา บุญมี<sup>3</sup>  
และ กীরติกานต์ พิริยะกุล<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> อุทยานเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup> กองอาคารและสถานที่, มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

<sup>3</sup> ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: keeratikan.p@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 กันยายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 17 พฤศจิกายน 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 3 ธันวาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 23 ธันวาคม 2567

**บทคัดย่อ:** บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยแก้วและของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชนต่อกำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัด เพื่อลดปริมาณซีเมนต์และน้ำของเสียจากจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชนมาใช้สำหรับพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้แก้วลอยและแก้วจมเป็นส่วนผสมทำการทดสอบกำลังตัดตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 ทรายซีเมนต์บดอัดผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนักทรายแห้งผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยปริมาตร ใช้ความยาวของเส้นใยแก้วที่ 3, 6 และ 12 มิลลิเมตร สัดส่วนแก้วลอย:แก้วจมที่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ทำการบ่มที่ 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังตัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แสดงปริมาณปูนซีเมนต์มีผลต่อกำลังตัดของเมทริกซ์โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ร้อยละ 5 ความเหนียวที่ระยะแอนตัวของทรายซีเมนต์แปรผันโดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ปริมาณเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 1.0 ถึง 1.5 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่ง DI และ PSR เป็น 1 แสดงพฤติกรรมการแอนแบบวัสดุอ่อน ความยาวของเส้นใยแก้วแปรผันโดยตรงต่อระยะการแอนตัวซึ่งความยาวของเส้นใยแก้วที่เหมาะสมคือ 12 มิลลิเมตร ปริมาณแก้วลอยทดแทนปูนซีเมนต์อยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 15 ปริมาณสัดส่วนแก้วลอย:แก้วจมที่เหมาะสมคือ 25:75 และพบว่าที่บ่ม 90 วันมีค่าความเหนียวสูงที่สุด

**คำสำคัญ:** กำลังตัด; ทรายซีเมนต์บดอัด; เส้นใยแก้ว; ของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชน



# Effect of Glass Fiber and Municipal Solid Waste Incineration on Bending Stress of Compacted Cement Sand

Chalermpon Wungsumpow<sup>1,3</sup>, Sakol Pochalard<sup>2,3</sup>, Pimnapat Kammawong<sup>3</sup>,  
Sunantha Simachan<sup>3</sup>, Araya Boonmee<sup>3</sup> and Keeratikan Piriyakul<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> KMUTNB Techno Park, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok

<sup>2</sup> Building and Landscape Division, Suan Dusit University, Bangkok

<sup>3</sup> Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

\* Corresponding author, E-mail: keeratikan.p@cit.kmutnb.ac.th

Received: 3 September 2024; Revised: 17 November 2024; Accepted: 3 December 2024

Online Published: 23 December 2024

**Abstract:** This research article studies on the effect of glass fiber and municipal solid waste from the RDF power plant to bending stress of compacted cement sand to reduce cement and municipal solid waste for development of the green construction materials. Fly ash (FA) and Bottom ash (BA) are mixed into the compacted cement sand and tested according to ASTM C1609-10 standard. Samples are prepared by adding the cement content between 3%, 5% and 7% by weight. The glass fiber is mixed at 0%, 0.5%, 1%, 1.5% and 2% by volume. The glass fiber lengths are 3, 6 and 12 mm. The FA:BA ratios are 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100. The curing times are 7, 14, 28, 60 and 90 days. It was found that bending stress is increased with increasing the cement content, that is direct proportion to the bending stress of the matrix. The optimum cement content is 5%. The toughness is in direct proportion to the cement content. The glass fiber content is optimum at 1% to 1.5%. The DI and PSR are 1, showing that the softening behavior. The glass fiber length is recommended at 12 mm. The FA content is optimum of about 10% to 15%. The FA:BA ratio is recommended at 25:75. The curing time is recommended at 90 days

**Keywords:** Bending Stress; Compacted Cement Sand; Glass Fiber; Municipal Solid Waste Incineration.



## 1. บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบัน การเติบโตอย่างต่อเนื่องของพื้นที่เมืองเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการเติบโตด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว มีการก่อสร้างจำนวนมาก และมีการขยายตัวของเมืองเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น อาคารที่อยู่อาศัยและอุตสาหกรรม ระบบขนส่งมวลชนเพื่อการเคลื่อนย้ายผู้คน และสิ่งอำนวยความสะดวกในการจัดการน้ำดื่มและสิ่งปฏิกูลสำหรับประชาชน [1] อัตราการเติบโตของประชากรสูง และมีการเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจ สังคม สิ่งแวดล้อม ตลอดจนเทคโนโลยี [2] และความจำเป็นในการจัดการกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้จำเป็นต้องลดลงการใช้ถ่านหินในการผลิตพลังงานและกระบวนการทางอุตสาหกรรม เป็นสาเหตุของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม การก่อสร้างก็มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์คาร์บอนต่ำ เพื่อมุ่งเน้นในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [3] การใช้ตะกรันและเถ้าลอยในคอนกรีตเป็นนึ่งซึ่งถึงความต้องการที่จะลดปริมาณการใช้ซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ [4] การนำเถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้ของเสียจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในประเทศไทย โดยการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในการผสมในดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งเถ้าลอยสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนได้ [5] นอกจากการนำผลพลอยได้จากถ่านหินมาช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังพบว่ามีการใช้เถ้าจมน้ำมาจากการเผาขยะชุมชนอีกด้วย โดยพบว่าปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2565 มีรายงานประมาณ 26.59 ล้านตัน ตามรายงานของ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [6] โดยทั่วไปงานก่อสร้างจะนำทรายแม่น้ำเป็นซึ่งเป็น

แหล่งทรายสำหรับการนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีต ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายและรวมถึงใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้าง มีการประมาณการการใช้ทรายของอุตสาหกรรมที่นำทรายจากแม่น้ำมาใช้มีปริมาณมากกว่า 60% ของจำนวนทรายทั้งหมดที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตทั่วโลก [7] ถึงแม้ว่าการนำทรายมาใช้ยังคงมีส่วนที่ต้องคำนึงถึงด้านคุณสมบัติของทรายแม่น้ำที่นำมาใช้ทางด้านคุณภาพและลักษณะที่แตกต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด ความแปรผันที่กล่าวมานี้ อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของส่วนผสมที่มีการนำทรายเข้ามาเป็นส่วนผสม [8] และการกำหนดความเหมาะสมของทรายก่อนนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของส่วนผสมที่มีทรายผสมผสมอยู่มีคุณภาพดีและทนทาน แต่ยังคงพบปัญหาโดยเฉพาะรอยแตกร้าวของวัสดุที่ผสมด้วยทราย [9]

การใช้เส้นใยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของดินซีเมนต์และชะลอการเกิดรอยแตกร้าวได้ ด้วยเติมปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น จำนวนและความกว้างของรอยแตกร้าวจะลดลง [10] สำหรับดินซีเมนต์เสริมเส้นใยพบว่า การเติมเส้นใยสามารถปรับปรุงความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุที่แข็งตัวด้วยซีเมนต์ได้ [11] คุณสมบัติแรงดึงตามธรรมชาติ คุณสมบัติการเสียดสีที่พื้นผิว และการกระจายตัวที่ดีของวัสดุเหล่านี้ ทำให้วัสดุเหล่านี้เชื่อมต่อกับสารประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ในโครงสร้างเครือข่าย ซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะของส่วนต่อประสานหน้าสัมผัส และปรับปรุงความสามารถของดินในการต้านทานการเสีรูปผลของการเสริมเส้นใยต่อความต้านทานแรงดึงของทรายเสริมซีเมนต์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพต่อ



## บทความวิจัย

การติดตั้งของทรายเสริมซีเมนต์ได้ [12] งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของส่วนผสมทรายเสริมซีเมนต์บดอัดเสริมเส้นใยแก้ว โดยนำถ้ำลอย และถ้ำจมนจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal solid waste incineration) มาผสมในอัตราส่วนผสมต่างๆ โดยถ้ำลอย และถ้ำจมนนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ และเส้นใยแก้ว นำมาเสริมกำลังตัด เพื่อเป็นแนวทางในการต่อยอดใช้ประโยชน์จากของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชนให้เกิดนวัตกรรมวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเรียกวัดวัสดุที่นำมาศึกษานี้ว่า ทรายซีเมนต์บดอัดสีเขียว (Green Compacted Cement Sand)

## 2. ขั้นตอนการวิจัย

### 2.1 ทราย

ทรายซิลิกาที่อยู่มากมายในหลายภูมิภาคของประเทศไทย โดยมีลักษณะทางกายภาพที่โดดเด่นเช่น ความแข็ง ทนต่อสารเคมี และทนความร้อน ตลอดจนราคาที่ต่ำ หินและแร่ธาตุที่มีในซิลิกา เช่น ควอทซ์ ควอทซ์ไฮดรอกไซด์ ทรายซิลิกา ร่วมกับซิลิกาชนิดอื่นๆ เช่น อากेट อเมทิสต์ แจสเปอร์ หินเหล็กไฟ ฯลฯ ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นทรายแม่น้ำจากร้านขายวัสดุก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครที่มีการกระจายขนาดเม็ดทรายดังรูปที่ 1 และมีคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 1

### 2.2 เส้นใยแก้ว

ใยแก้วเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยเส้นใยแก้วที่ละเอียดมากจำนวนมาก ใยแก้วมีคุณสมบัติเชิงกลที่เทียบเคียงได้กับเส้นใยอื่น ๆ เช่น โพลีเมอร์และคาร์บอนไฟเบอร์ ใยแก้วจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์หลายชนิด เพื่อสร้างวัสดุคอมโพสิตโพลีเมอร์

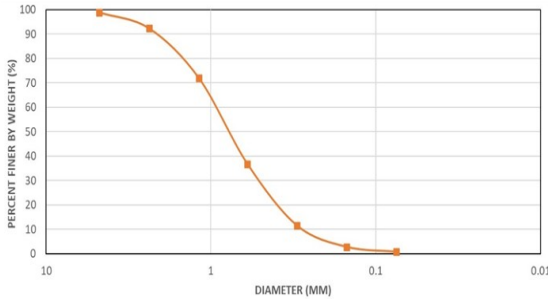
### ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายแม่น้ำ

Property	Value
Specific gravity ( $G_s$ )	2.65
Gravel content (%)	10.52
Sand content (%)	80.58
Fine content (%)	8.90
$D_{60}$ (mm)	0.93
$D_{30}$ (mm)	0.49
$D_{10}$ (mm)	0.29
Coefficient of Uniformity ( $C_u$ )	3.21
Coefficient of Curvature ( $C_c$ )	0.89
Soil classification (USCS)	SP
Maximum void ratio	0.83
Minimum void ratio	0.28
Maximum dry unit weight ( $kN/m^3$ )	15.70
Optimum moisture content (%)	6.19

เสริมแรงด้วยเส้นใย (FRP) ที่แข็งแรงมากและค่อนข้างมีน้ำหนักเบา เรียกว่าพลาสติกเสริมด้วยแก้ว (GRP) เส้นใยแก้ว แบ่งตาม ASTM แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยสำหรับงานทั่วไป และเส้นใยชนิดพิเศษสูง ซึ่งเกือบประมาณ 90% เป็นเส้นใยสำหรับใช้งานทั่วไป สำหรับการจำแนกเส้นใยแก้วตาม ASTM บริษัท Owens Corning, Ventrotex, Ahlstrom และ Pilkington เป็นบริษัทผลิตเส้นใยแก้ว และองค์กรประกอบดังแสดงในตารางที่ 2 โดยในการวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยยี่ห้อ Owens Corning รุ่น Advantex CS 979-14 ชนิด E-glass ที่ความยาว 3, 6 และ 12 มิลลิเมตร



## บทความวิจัย



รูปที่ 1 กราฟแสดงการกระจายตัวของตัวอย่างทราย

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว (เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก)

Components	AR-glass	C-glass	E-glass	S-glass
SiO <sub>2</sub>	62.2	65	55.2	65
ZrO <sub>2</sub>	16.7	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	0.1	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.74	4	14.8	25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.3	0.3	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5	7.3	-
CaO	5.2	14	18.7	-
MgO	0.16	3	3.3	-
Na <sub>2</sub> O	14.3	8.5	0.3	-
K <sub>2</sub> O	0.4	-	0.2	-
LiO <sub>2</sub>	-	-	-	-
F <sub>2</sub>	-	-	0.3	-

## 2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนประกอบหลักของซีเมนต์เพสต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ORDINARY PORTLAND CEMENT TYPE 1) ผลิตขึ้นโดยให้คุณภาพของปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติถูกต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ในมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-2562 ประเภท 1 และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C-150 TYPE 1 การผสมปูนซีเมนต์จะทำให้ดินเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัด กำลังเฉือน และลดการซึมผ่านของน้ำ

## 2.4 เถ้าลอย (Fly Ash) และ เถ้าจม (Bottom Ash)

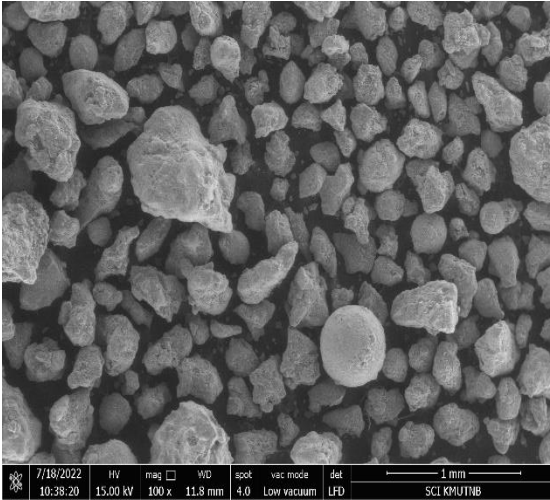
เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอยชุมชนจากบริษัท โกลบอล เพาเวอร์ ซินเนอร์ยี จำกัด (มหาชน) หรือ GPSC จังหวัดระยอง ซึ่งใช้วิธีการเก็บตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C311/C311M-22 ซึ่งเม็ดที่ตกลงมาด้านล่างเรียกว่าเถ้าจม Bottom Ash (BA) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 และเม็ดที่ลอยขึ้นด้านบนปล่องไฟเรียกว่า เถ้าลอย Fly Ash (FA) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 ถึง 50 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C618 ประกอบด้วยซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ประกอบขึ้นเป็นองค์ประกอบทางเคมีของ BA วัสดุเหล่านี้จัดอยู่ในประเภทวัสดุปอซโซลานิก ASTM C 618 และ FA ถูกใช้เป็นตัวเพิ่มความคงตัวในการรักษาเสถียรภาพของดินบ่อกว่า BA เนื่องจากมีปริมาณ SiO<sub>2</sub> สูงมากกว่า BA ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ FA ยังมีอนุภาคที่ละเอียดมากโดยมีจำนวนอนุภาคบนพื้นที่ผิวที่สูงกว่า ซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกด้วย [13]

## 3. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ ทำการผสมทรายให้ได้ความชื้นที่ร้อยละ 6.19 โดยใช้น้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนคงที่ (W/C) ร้อยละ 0.5 ในทุกสัดส่วน ผสมปูนซีเมนต์ เถ้าลอย เถ้าจม และเส้นใยแก้วในสัดส่วน ดังตารางที่ 3



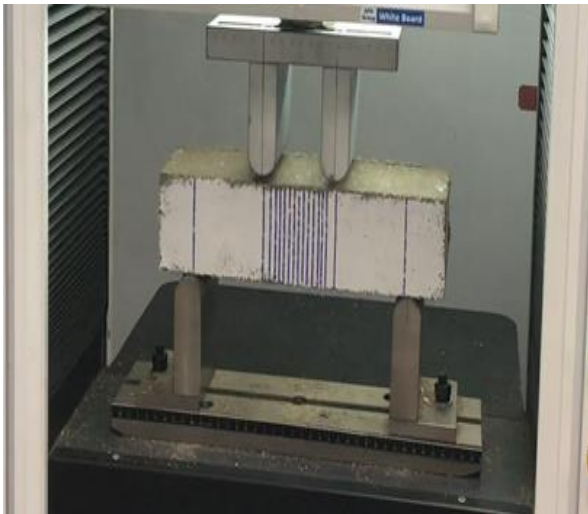
บทความวิจัย



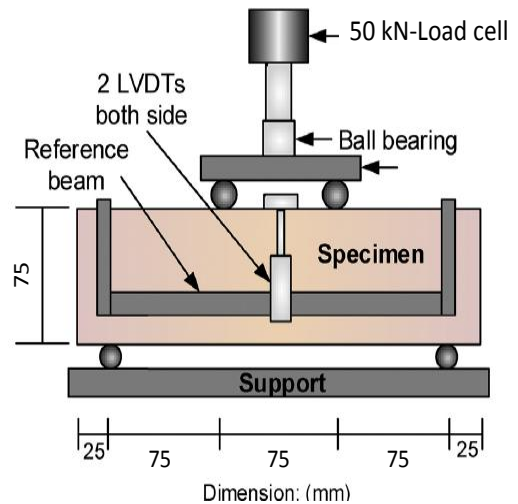
รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าจวมจากโรงไฟฟ้า  
เชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชน

ทดสอบกำลังรับแรงดัด สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C 1609-10 ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ United Test รุ่น WDW-100Y มาตรฐานน้ำหนักแบบ Load Cell ขนาด 100 kN โดยมีวิธีการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ และขั้นตอนการทดสอบนำคานตัวอย่างวางบนแท่นเครื่องทดสอบโดยวางด้านที่เรียบเข้าหาแท่นกคน้ำหนัก การวางให้หัวกดอยู่ที่ระยะ  $L/2$  ของคานทดสอบ และมีระยะพาดตัวอย่างเท่ากับ 225 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 (ก) และ 3 (ข)

ตั้งค่าโปรแกรมของเครื่องทดสอบ โดยโปรแกรมทดสอบเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อคุณสมบัติเบื้องต้น



(ก) รูปแสดงการวางตัวอย่างทดสอบ



(ข) รูปแสดงการติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ และตัวอย่างทดสอบ



ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนการผสมตัวอย่างของทรายซีเมนต์

Group	Cement Content (g)	Fiber Content (g)	Cement (g)	Fiber Length (mm)	Fly Ash (g)	Bottom Ash (g)	Day
A1	94.12	44.82	70.59	6	23.53	0	28
A2	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
A3	219.61	44.82	164.71	6	54.90	0	28
B1	156.87	0.00	117.65	6	39.22	0	28
B2	156.87	22.41	117.65	6	39.22	0	28
B3	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
B4	156.87	67.23	117.65	6	39.22	0	28
B5	156.87	89.64	117.65	6	39.22	0	28
C1	156.87	44.82	117.65	3	39.22	0	28
C2	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
C3	156.87	44.82	117.65	12	39.22	0	28
D1	156.87	44.82	141.18	6	15.69	0	28
D2	156.87	44.82	133.34	6	23.53	0	28
D3	156.87	44.82	125.49	6	31.37	0	28
D4	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
D5	156.87	44.82	109.81	6	47.06	0	28
D6	156.87	44.82	101.96	6	54.90	0	28
D7	156.87	44.82	94.12	6	62.75	0	28
E1	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	7
E2	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	14
E3	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
E4	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	60
E5	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	90
F1	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
F2	156.87	44.82	117.65	6	29.41	9.80	28
F3	156.87	44.82	117.65	6	19.61	19.61	28
F4	156.87	44.82	117.65	6	9.80	29.41	28
F5	156.87	44.82	117.65	6	0	39.22	28
CM	156.87	0	0	0	0	0	28
CM+FB	156.87	44.82	0	6	0	0	28



โดยกำหนดอัตราการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.05 มม./นาที และระยะเวลาการแอ่นตัวสุทธิเท่ากับ 3 มิลลิเมตร หรือจนกว่าการทดสอบดำเนินจนถึงการเกิดวิบัติ จึงหยุดการทดสอบแล้วเก็บข้อมูลที่บันทึกมา ข้อมูลที่บันทึกได้มาแปลงเป็นพารามิเตอร์ระหว่างน้ำหนักและระยะเวลาการแอ่นตัวสุทธิ แสดงในรูปที่ 3 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C78/C78M

ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนการผสมตัวอย่างของทรายซีเมนต์ โดยแบ่งเป็น 6 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่ม A ศึกษาผลกระทบของปริมาณปูนซีเมนต์ กลุ่ม B ศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยแก้ว กลุ่ม C ศึกษาผลกระทบของความยาวเส้นใยแก้ว กลุ่ม D ศึกษาผลกระทบของปริมาณถั่วลอย กลุ่ม E ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม กลุ่ม F ศึกษาผลกระทบของปริมาณเถ้าจม และ กลุ่ม CM กับกลุ่ม CM+FB เป็นกลุ่มตัวอย่างควบคุม

#### 4. การคำนวณ

หลังการทดสอบจะได้ค่าข้อมูลเพื่อมาแปลงเป็นพารามิเตอร์เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิดังรูปที่ 4 (ก) และ 4 (ข) ตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 เพื่อหาพฤติกรรมของทรายซีเมนต์บดอัด โดยมีตัวแปรดังนี้

$L$  = ช่วงความยาวพาดคาน

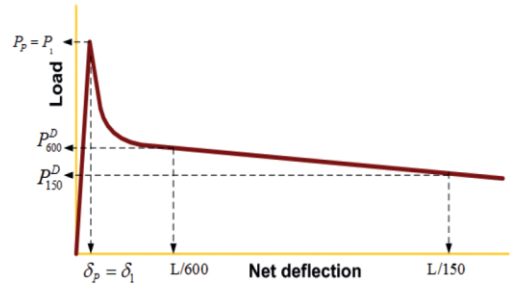
$P_p$  = น้ำหนักสูงสุด

$P_1$  = น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก

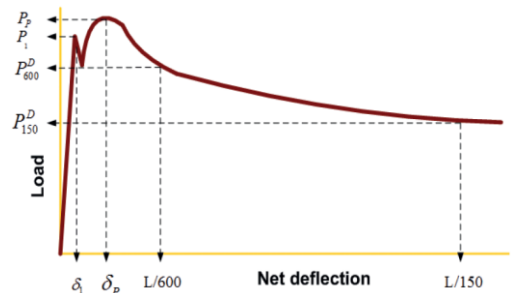
$\delta_p$  = ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิที่น้ำหนักสูงสุด

$\delta_1$  = ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิที่น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก

$f_p$  = กำลังตัดสูงสุด



(ก) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณสำหรับน้ำหนักสูงสุดครั้งแรกเท่ากับน้ำหนักสูงสุด



(ข) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณเมื่อน้ำหนักสูงสุดมากกว่าน้ำหนักสูงสุดในตอนแรก

รูปที่ 4 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะเวลาแอ่นตัว

$f_1$  = กำลังตัดสูงสุดครั้งแรก

$P_{600}^D$  = น้ำหนักคงเหลือที่ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิ L/600

$f_{600}^D$  = กำลังตัดคงเหลือที่ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิ L/600

$P_{150}^D$  = น้ำหนักคงเหลือที่ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิ L/150

$f_{150}^D$  = กำลังตัดคงเหลือที่ระยะเวลาแอ่นตัวสุทธิ L/150





## บทความวิจัย

$T_{150}^D$  = พื้นที่ใต้โค้งความสัมพันธ์ระหว่าง  
น้ำหนักกับระยะแอ่นตัว ตั้งแต่ 0 ถึง L/150

DI = ดัชนีความยืด

PSR = อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุด

กำลังดัด ( $f$ ) สามารถคำนวณดังสมการ (1)

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

โดย  $P$  คือน้ำหนักใดๆ ที่ต้องการทราบค่ากำลังดัด  
สำหรับอัตราส่วนกำลังเทียบเท่า

$L$  = ความยาวช่วง

$b$  = ความกว้างของตัวอย่างทดสอบ

$d$  = ความลึกของตัวอย่างทดสอบ

ดังนั้น เส้นโค้งของน้ำหนักกับระยะการแอ่นตัวสามารถ  
คำนวณค่า  $R_{T,150}^D$  ได้ [14] ดังสมการที่ (2)

$$R_{T,150}^D = \frac{150T_{150}^D}{f_1bd^2} \times 100\% = \frac{150T_{150}^D}{\frac{PL}{bd^2}} = \frac{T_{150}^D}{P_1 \frac{L}{150}} \quad (2)$$

โดยค่า  $R_{T,150}^D$  ที่สูงกว่า 100% บ่งบอกว่าตัวอย่างจะมีความ  
เหนียวสูงในทางกลับกันหากค่า  $R_{T,150}^D$  ที่น้อยกว่า  
100 % หมายถึงตัวอย่างจะมีความเหนียวต่ำ

$$DI = \frac{\delta_p}{\delta_1} \quad (3)$$

โดยค่า  $DI$  บ่งบอกคุณสมบัติความเป็นวัสดุเหนียว  
(Ductile) ของตัวอย่าง [14] ดังสมการที่ (3)

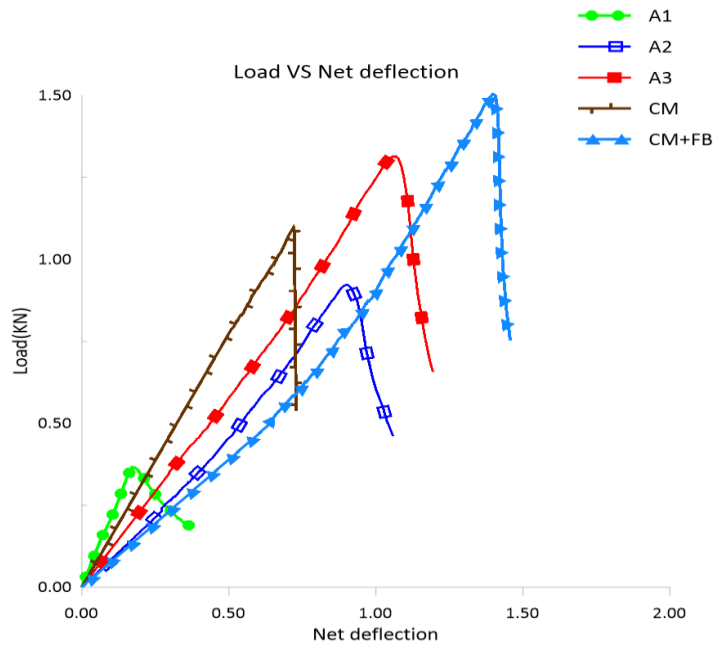
$$PSR = \frac{f_p}{f_1} \quad (4)$$

โดยค่า  $PSR$  ที่มีค่าเท่ากับ 1 บ่งบอกว่าตัวอย่างแสดง  
พฤติกรรมการอ่อนแบบวัสดุอ่อน (Softening) แต่ถ้ามีค่า  
มากกว่า 1 จะบ่งบอกว่าตัวอย่างแสดงพฤติกรรมการอ่อน  
แบบวัสดุเหนียว (Hardening) [14] ดังสมการที่ (4)

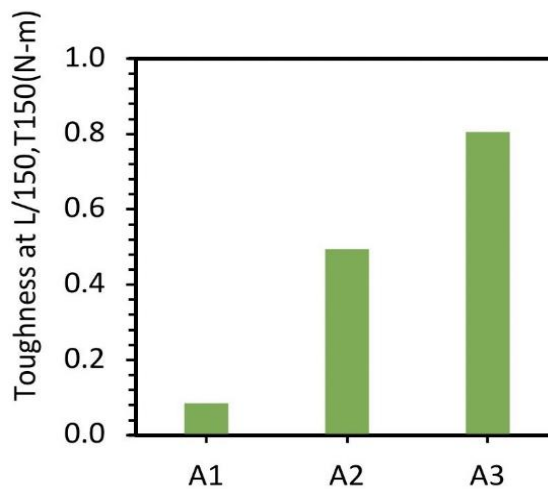
## 5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

### 5.1 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์และ เถ้าลอยที่เหมาะสม

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบ กำลังดัดใน  
ห้องปฏิบัติการของทรายซีเมนต์บดอัดของกลุ่ม A  
ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 เส้นใยแก้วยาว 6 มิลลิเมตร  
ในสัดส่วนร้อยละ 1 โดยปริมาตร และปริมาณซีเมนต์  
ที่แตกต่างกัน โดย A1 เป็นตัวอย่างคานที่ผสมด้วย  
ซีเมนต์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก A2 ตัวอย่างคานที่ผสม  
ด้วยซีเมนต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ A3 เป็น  
ตัวอย่างคานที่ผสมด้วยซีเมนต์ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก  
จากผลการทดสอบกำลังดัดพบว่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นตาม  
ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณ  
ปูนซีเมนต์มีผลโดยตรงต่อกำลังของเมทริกซ์ เมื่อ  
เปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่าง A2  
กับตัวอย่างควบคุม CM ที่ผสมปูนซีเมนต์เพียงอย่าง  
เดียวที่ร้อยละ 5 พบว่ากำลังดัดลดลง แสดงให้เห็นว่า  
การเพิ่มเถ้าลอย FA ในสัดส่วนที่ร้อยละ 25 ทดแทน  
ปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังดัดลดลงแต่ระยะการแอ่นตัว  
เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบของตัวอย่าง  
ควบคุม CM+FB ที่ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 โดย  
น้ำหนักและเส้นใยแก้วร้อยละ 1 โดยปริมาตร พบว่ามี  
กำลังดัดและระยะการแอ่นตัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุก  
ตัวอย่าง โดยมี DI และ PSR เป็น 1 แสดงว่าคานมี  
พฤติกรรมการอ่อนแบบวัสดุอ่อน (Softening) รูปที่ 6  
แสดงความเหนียวที่ระยะแอ่นตัวที่ L/150 ของคาน  
A1 ถึง A3 พบว่าความเหนียวที่ระยะแอ่นตัว  
(Toughness at L/150) แปรผันโดยตรงกับปริมาณ  
ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 กำลังตัดของทรายซี่เมนต์บดอัดกลุ่ม A



รูปที่ 6 ความเหนียวที่ระยะแ่นตัวของกลุ่ม A (Toughness at L/150, T150 (N-m))

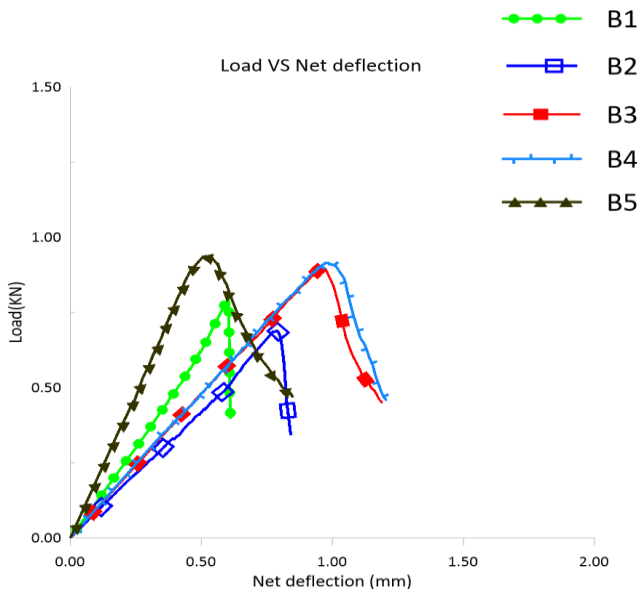


### 5.2 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม

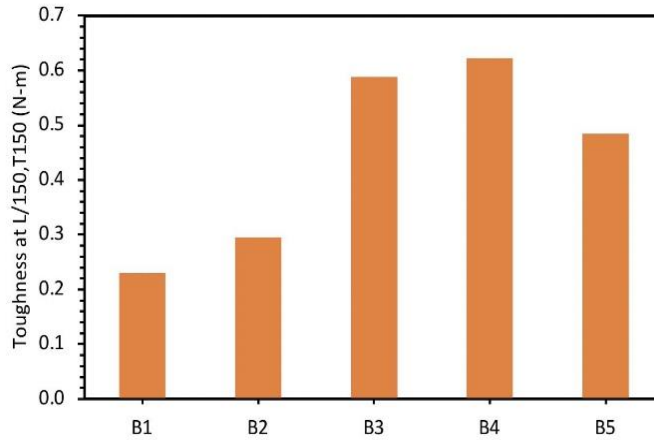
รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วของกลุ่ม B โดยคาน B3 และคาน B4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 1.0 ถึง 1.5 โดยปริมาตรจะมีระยะการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งกำลังดัดของคานในกลุ่ม B ใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 1 kN รูปที่ 8 แสดงความเหนียวที่ระยะแอ่นตัวของกลุ่ม B และยืนยันว่าปริมาณเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 1.0 ถึง 1.5 โดยปริมาตร ให้ระยะการแอ่นตัวที่สูง โดย DI และ PSR เป็น 1 แสดงว่าคานมีพฤติกรรมการแอ่นแบบวัสดุอ่อน (Softening) โดยปริมาณดังกล่าวยังสอดคล้องกับปริมาณการเติมเส้นใยโพลีเอทิลีนในการปรับปรุงคุณภาพดิน [15]

### 5.3 ผลการทดลองเพื่อหาความยาวเส้นใยที่เหมาะสม

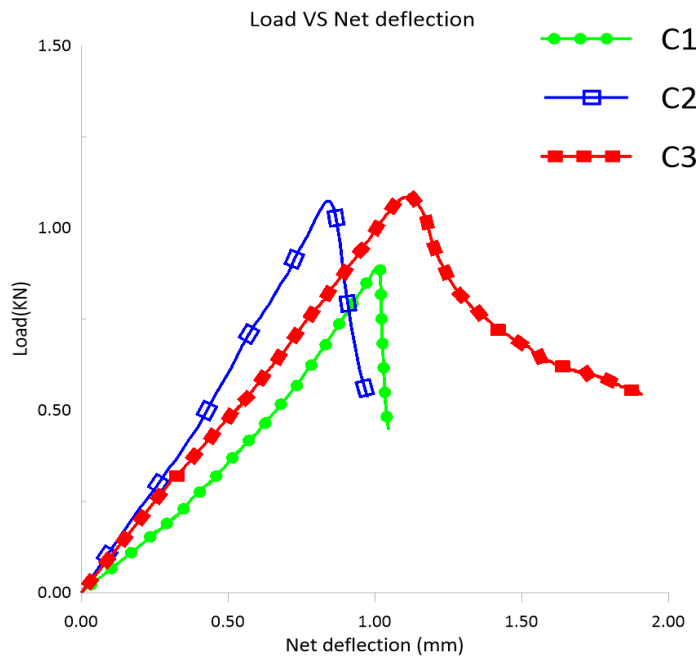
รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใย ที่ใช้ความยาวของเส้นใยแก้วที่แตกต่างกันของกลุ่ม C โดย C1 ใช้เส้นใยแก้วยาว 3 มิลลิเมตร C2 ใช้เส้นใยแก้วยาว 6 มิลลิเมตร และ C3 ใช้เส้นใยแก้วยาว 12 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบกำลังดัดพบว่า C3 มีระยะการแอ่นตัวสูงสุด รูปที่ 10 แสดงความเหนียวที่ระยะแอ่นตัวของกลุ่ม C และยืนยันว่าปริมาณเส้นใยแก้วที่ความยาว 12 มิลลิเมตร มีความเหนียวสูงที่สุด ค่า DI และ PSR เป็น 1 แสดงว่าคานมีพฤติกรรมการแอ่นแบบวัสดุอ่อน (Softening)



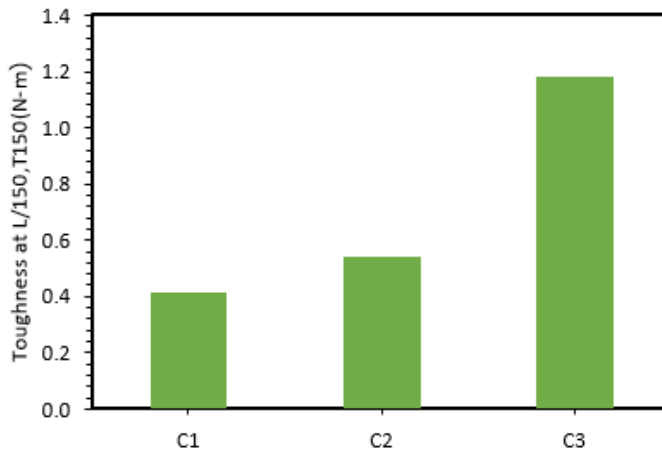
รูปที่ 7 กำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม B



รูปที่ 8 ความเหนียวที่ระยะแฉ่งตัวของกลุ่ม B (Toughness at L/150,T150 (N-m))



รูปที่ 9 กำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม C



รูปที่ 10 ความเหนียวที่ระยะแ่นตัวของกลุ่ม C (Toughness at L/150,T150 (N-m))

#### 5.4 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม

รูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันของกลุ่ม D โดย D1 ใช้เถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 โดย D2, D3, D4, D5, D6 และ D7 ใช้เถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ที่ร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 จากการทดสอบพบว่าคาน D1 และ D2 มีค่ากำลังดัดสูงที่สุดและมีระยะแ่นตัวสูง รูปที่ 12 แสดงความเหนียวที่ ระยะแ่นตัวของกลุ่ม D อย่างไรก็ตาม DI และ PSR เป็น 1 แสดงว่าคานมีพฤติกรรมการแ่นแบบวัสดุอ่อน (Softening)

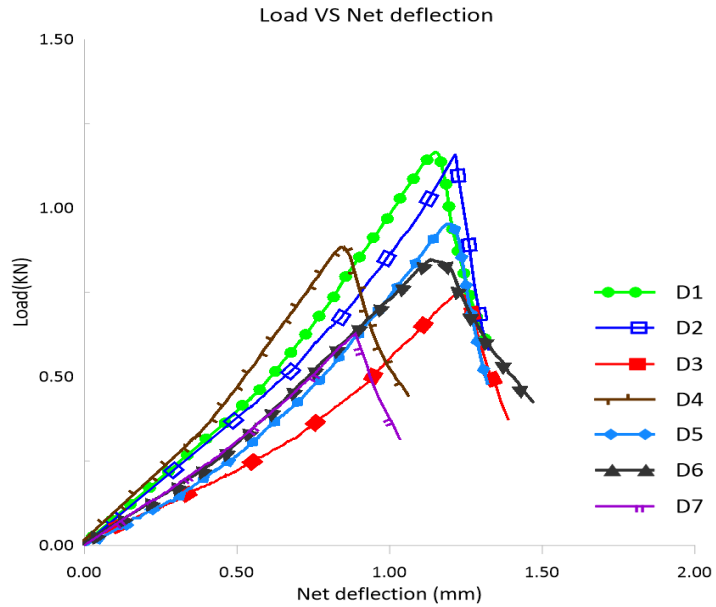
#### 5.5 ผลการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาบ่มที่เหมาะสม

รูปที่ 13 ผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่บ่มในระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดย E1, E2, E3, E4 และ E5 ใช้เวลา

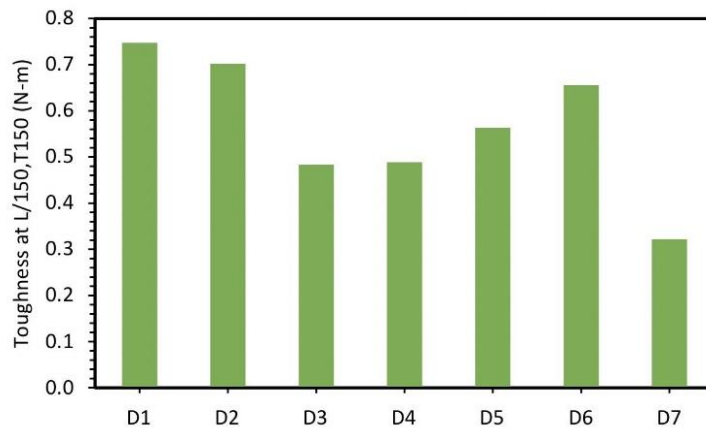
บ่มที่ 7, 14, 28, 60 และ 90 วันตามลำดับ จากการทดสอบพบว่ากำลังดัดจะมีค่าเพียงพอเมื่อบ่มตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป โดยคาน E3, E4 และ E5 มีกำลังดัดสูงจากรูปที่ 14 ความเหนียวที่ระยะแ่นตัวของกลุ่ม E พบว่า E5 ที่ บ่ม 90 วันมีค่าความเหนียวสูงที่สุด

#### 5.6 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเถ้าจมนที่เหมาะสม

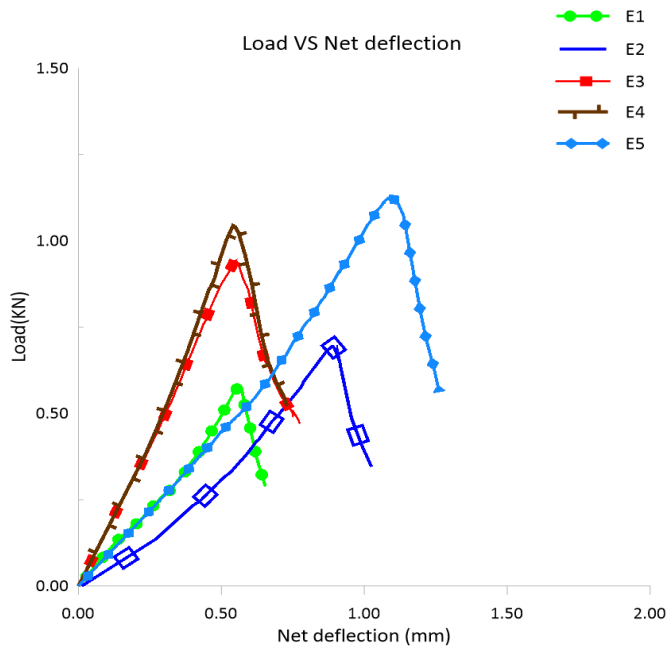
รูปที่ 15 แสดงผลการทดสอบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว เถ้าลอยและเถ้าจมนทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันของกลุ่ม F โดย F1 ใช้เถ้าลอยร้อยละ 100 ต่อเถ้าจมนร้อยละ 0 ส่วน F2, F3, F4, และ F5 ใช้สัดส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าจมน (FA:BA) ทดแทนซีเมนต์ที่ร้อยละ 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ตามลำดับ ระยะเวลาบ่ม 28 วัน จากการทดสอบพบว่าคาน F4 มีค่ากำลังดัดสูงที่สุด และใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมของคาน F1 รูปที่ 16 ยืนยันว่าคาน F4 มี ค่าความเหนียว (Toughness at L/150,T150 (N-m)) สูงที่สุด



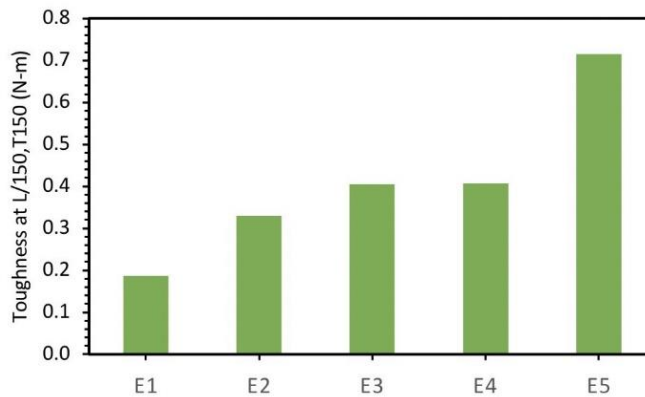
รูปที่ 11 กำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม D



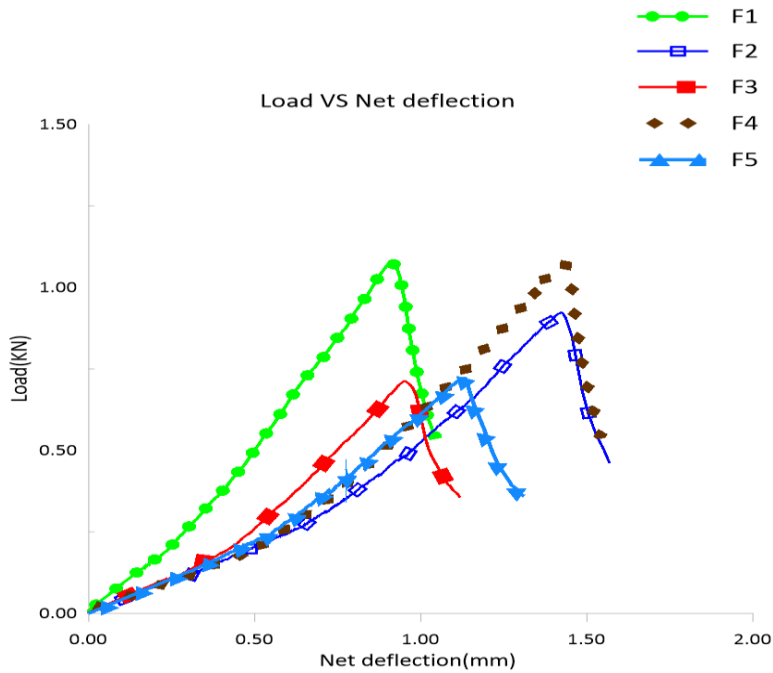
รูปที่ 12 ความเหนียวที่ระยะแฉ่งตัวของกลุ่ม D (Toughness at L/150,T150 (N-m))



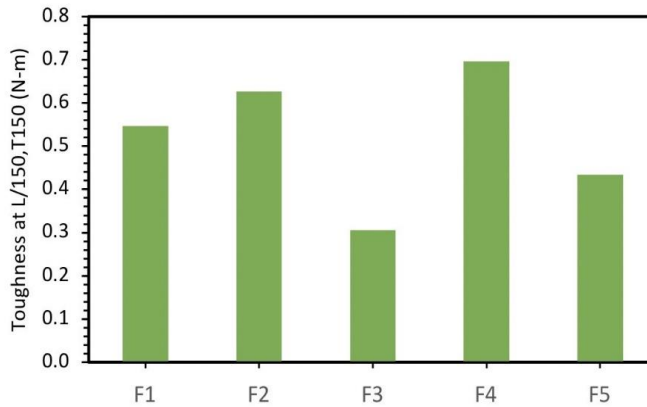
รูปที่ 13 กำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม E



รูปที่ 14 ความเหนียวที่ระยะแ่นตัวของกลุ่ม E (Toughness at L/150, T150 (N-m))



รูปที่ 15 กำลังตัดของทรายซี่เมนต์บดอัดกลุ่ม F



รูปที่ 16 ความเหนียวที่ระยะแ่นตัวของกลุ่ม F (Toughness at L/150,T150 (N-m))





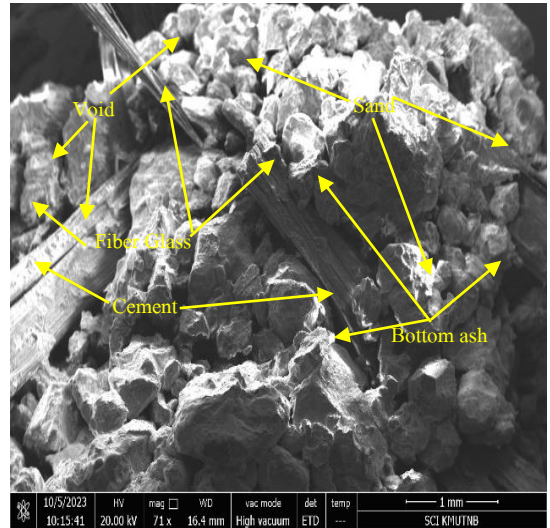
## 5.7 การวิเคราะห์ภาพ SEM

รูปที่ 17 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของทรายแม่น้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ซีเมนต์ เถ้าจมน และเส้นใยแก้ว การขยายภาพ SEM 70x แสดงให้เห็นว่าเถ้าจมนถูกผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับใยแก้วและเมทริกซ์ทราย-ซีเมนต์ โดยสัมพันธ์กับแรงเสียดทานในสัดส่วนกับความยาวของเส้นใยแก้วที่ใช้ในการแสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิตสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้อย่างไร และยังส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพความแข็งแรงของซีเมนต์ในทรายอีกด้วย ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะของวัสดุคอมโพสิตและการกระจายตัวของเส้นใยแก้ว ความแข็งแรงจะเพิ่มมากขึ้นตามความยาวของเส้นใยแก้ว และสามารถเกาะติดกันได้

## 6. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

- กำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์มีผลโดยตรงต่อกำลังของเมทริกซ์ โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมแนะนำอยู่ที่ร้อยละ 5 ความเหนียวที่ระยะแอนตัว (Toughness at L/150) ของทรายซีเมนต์บดอัดแปรผันโดยตรงกับปริมาณปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น
- ปริมาณเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 1.0 ถึง 1.5 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมทรายซีเมนต์บดอัดซึ่ง DI และ PSR เป็น 1 แสดงพฤติกรรมการแอนแบบวัสดุอ่อน (Softening)



รูปที่ 17 ภาพถ่าย SEM 70 X ของทราย ซีเมนต์ เถ้าจมน และเส้นใยแก้ว

- ความยาวของเส้นใยแก้วแปรผันโดยตรงต่อระยะการแอนตัวของทรายซีเมนต์บดอัด โดยความยาวของเส้นใยแก้วที่เหมาะสมสำหรับผสมในทรายซีเมนต์บดอัดควรจะเป็น 12 มิลลิเมตร
- ปริมาณเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ของทรายซีเมนต์บดอัดควรอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 15 ซึ่งให้กำลังตัดและการแอนตัวสูงที่สุด
- ปริมาณเถ้าจมนที่เหมาะสมในส่วนผสมของทรายซีเมนต์บดอัด สัดส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าจมน (FA:BA) ที่เหมาะสมควรใช้ 25:75 ให้ค่าความเหนียว (Toughness at L/150) สูงที่สุด
- ระยะเวลาในการบ่มทรายซีเมนต์บดผสมเถ้าลอยควร อยู่ระหว่าง 28 ถึง 90 วัน โดยกำลังตัดจะมีค่าเพียงพอเมื่อบ่มตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป และพบว่าที่บ่ม 90 วันมีค่าความเหนียวสูงที่สุด



## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สัญญารับทุน CIT-2022-Grad-23

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Dubey, S. Gangopadhyay and W. Wadhwa, Occupational structure and incidence of poverty in Indian towns of different sizes, *Review of Development Economics*, 2001, 5, 49-59.
- [2] T. Sadashivam and S. Tabassu, Trends of urbanization in India: Issues and challenges in the 21<sup>st</sup> century”, *International Journal of Information Research and Review*, 2016, 3, 2375-2384.
- [3] H. Lu, C. Wang, Q. Li, R. Wiser and K. Porter, Reducing wind power curtailment in China: Comparing the roles of coal power flexibility and improved dispatch, *Climate Policy*, 2019, 19, 623-635.
- [4] C.Y. Lin and T.A. Chen, Effects of composition type and activator on fly ash-based alkali activated materials, *Polymers*, 2021, 14, 63.
- [5] A. Petcherdchoo, S. Pochalard and K. Piriyakul, Use of bender element tests for determining shear modulus of fly-ash and cement admixed Bangkok clay with considering unconfined compressive strength, *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18, 1-13.
- [6] <https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2565>. (Accessed on 30 August 2024)
- [7] H.L. Dinh, J. Liu, D.E. Ong and J.H. Doh, A Sustainable solution to excessive river sand mining by utilizing by-products in concrete manufacturing: A state-of-the-art review, *Cleaner Materials*, 2022, 6, 1-85.
- [8] <https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/concrete/270-concrete-definition-components-types>. (Accessed on 30 August 2024)
- [9] M.W.M. Abdias, M.M. Blanche, U.J.P. Nana, H.F. Abanda, N. François, and P. Chrispin, River sand characterization for Its use in concrete: A revue, *Open Journal of Civil Engineering*, 2023, 13, 353-366.
- [10] X. Yang, S. Liang, Z. Hou, D. Feng, Y. Xiao and S. Zhou, Experimental study on strength of polypropylene fiber reinforced cemented silt soil, *Applied Sciences*, 2022, 12, 8318.



- [11] C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen and Y. Cai, Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25, 194-202.
- [12] P. Jamsawang, P. Voottipruex and S. Horpibulsuk, Flexural strength characteristics of compacted cement-polypropylene fiber sand, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 27(9), 04014243.
- [13] J. Hu, Z. Ge and K. Wang, Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times”, *Construction and building materials*, 2014, 50, 657-663.
- [14] P. Jamsawang, P. Voottipruex, and S. Inthapichai, Improvement of the bending stress of polypropylene fiber-reinforced compacted cement sand”, *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2014, 24, 43-55.
- [15] S. Pochalard, C. Wungsumpow and K. Piriyaikul, Enhancement on compressive strength of Bangkok clay cement using novel high-strength polyethylene fibers, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1-8.