

การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ ผสมเส้นใยไมโครไฟเบอร์ Study of Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete Mixed with Microfiber

บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา^{1*} ปรีดา จันทวงษ์² และ โยธิน อึ้งกุล³
Borvorn Israngkura Na Aydhya^{1*} Preeda Chantawong² and Yothin Ungkoon³

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำแบบผสมไมโครไฟเบอร์ ได้แก่งำลังต้านทานแรงอัด กำลังต้านทานแรงดัด ความหนาแน่น และอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาโดยมีการใช้เส้นใยไมโครไฟเบอร์ เพื่อเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำไมโครไฟเบอร์มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยซิลิกาและแคลเซียมออกไซด์ เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์แต่น้ำหนักเบา จึงได้ทดลองนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10.0 ผลการศึกษาพบว่า ส่วนผสมการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม มีส่วนช่วยให้กำลังต้านทานแรงอัดและกำลังต้านทานแรงดัดเพิ่มมากขึ้น ผลการเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณอัตราส่วนผสมเท่ากัน และหากเปรียบเทียบผลการทดสอบกับค่าตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก 1505 - 2541 พบว่าสัดส่วนผสมแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 2.5 ผ่านเกณฑ์โดยจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.70

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ (AAC) เส้นใยไมโครไฟเบอร์ ความหนาแน่น

Abstract

This paper research related to the investigation of mechanical properties of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Containing microfiber, i.e. compressive strength, flexural strength density, and water absorption. The production uses microfiber application instead of cement in AAC production. Microfiber comprises of Silica and Calcium oxide, with are also the main chemical components of cement, but with light weight. Thus, it has been used to replace the cement in the proportion of 0, 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 percent. The results show that, with the same cement quantity, the smaller particle has higher compressive strength and flexural strength. Based on the Thai Industrial Standard 1505-1998, the specimens in the proportion 2.5 percent, were claimed for AAC class 4.Type 0.70.

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

* Corresponding Author, Tel. 0-2287-9600 Ext. 9638, E-mail: ayudhya2003@yahoo.com

Keywords: Autoclaved Aerated Concrete (AAC), Microfiber, Density

1. บทนำ

สภาวะโลกร้อนเป็นปรากฏการณ์ของธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วโลกซึ่งมีสาเหตุที่เกิดจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล ขยะต่างๆ และการทำลายสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยมนุษย์ที่เกิดจากการขยายตัวของเมืองหรือชุมชนทำให้ป่าไม้ลดลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงวิธีการใช้ที่ดินสำหรับก่อสร้างบ้านเรือนที่อาศัยจากการขยายตัวของเศรษฐกิจส่งผลทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและสิ่งแวดล้อม ได้แก่ น้ำเสีย ขยะต่างๆ เช่น พลาสติก เศษวัสดุก่อสร้าง วัสดุจากทางเกษตร และอื่นๆ จากปัญหาดังกล่าวจึงเกิดผลกระทบโดยตรงต่อการดำรงชีวิตอย่างกว้างขวางในปัจจุบันนี้ ดังนั้นการแก้ปัญหาสำหรับภายในประเทศไทยได้มีการทำการศึกษายู่สองกรณี กรณีแรกได้มีการศึกษาหาวิธีลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลโดยการส่งเสริมให้มีใช้การใช้พลังงานทดแทนเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดปัญหามลพิษทางอากาศ และกรณีที่สองได้ศึกษาหาวิธีลดปริมาณขยะหรือของเสีย จากบ้านเรือนและภาคอุตสาหกรรมโดยการนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น มีการทำการศึกษาเศษพลาสติกอ่อน และอื่นๆ ที่ใช้แล้วนำกลับมาผลิตใหม่เป็นพลาสติกแข็ง วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และวัสดุก่อสร้างที่ใช้แล้วได้นำกลับมาใช้อีก จึงได้มีการศึกษาวัสดุเหลือใช้หรือใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้างและช่วยลดต้นทุนในการผลิตกันอย่างแพร่หลายกันทั้งภายในและต่างประเทศ เช่น ที่ประเทศฮ่องกง โดย Poon และคณะ [1] ได้การศึกษาวัสดุเหลือใช้จากคอนกรีตมาเป็นส่วนผสมคอนกรีตโครงสร้างของอาคาร โดยนำเศษคอนกรีตมาบดในขนาดต่างๆ เพื่อทดแทนการใช้หินดำ สำหรับเกาะยึดโครงสร้าง ผลการศึกษาจะพบว่ามีความแข็งแรงสูงสามารถนำไปใช้งานได้ และสามารถช่วยลดต้นทุนได้อีกทางหนึ่ง ต่อมาได้มีการศึกษาปัญหาของตะกรัน ณ ประเทศบราซิล โดย Sales และคณะ [2] ได้นำตะกรันน้ำเสียมาเป็นส่วนผสมคอนกรีตและมอร์ตาร์

โดยทำการศึกษาโดยนำตะกรันจากบ่อบำบัดน้ำเสียที่ตากแห้งแล้วอบที่อุณหภูมิ 110°C บดให้ได้ขนาดต่างๆ เพื่อเป็นส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับทดแทนทราย ผลการศึกษาพบว่า ส่วนผสมตะกรันร้อยละ 4 สามารถทนแรงอัดได้สูงประมาณ 26 MPa เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ข้อเสียใช้ต้นทุนในการผลิตมีราคาสูง ต่อมาได้มีการศึกษาปัญหามลพิษที่เกิดจากยางล้อรถยนต์ ซึ่งจะมีจำนวนมากหลังจากการใช้งานก็จะมีกลิ่นเหม็นสกปรก ถ้ามีการเผาทำลายก็จะก่อมลพิษทางอากาศ ถ้าทำการฝังดินก็ใช้เวลาานกว่าจะย่อยสลาย ก่อให้เกิดเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำยางบดมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา โดย Piti และคณะ [3]-[5] ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติความแข็งแรงกับคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ ประโยชน์ของงานวิจัยนี้คือ ช่วยลดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมและช่วยลดต้นทุนได้การผลิตได้ ต่อมาทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษท่อพลาสติก PVC ที่ใช้งานแล้วโดยบดละเอียด ณ ประเทศฮ่องกง โดย Kou และคณะ [6] มาเป็นส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับมวลเบาทั่วไป โดยจะทำการศึกษาในรูปของผงพลาสติก PVC บดละเอียดมาเป็นส่วนผสมสัดส่วนต่างๆ ของมวลเบาร้อยละ 0, 5, 15, 30 และ 45 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบจะพบว่าค่าอัตราการดูดกลืนต่ำ ค่าความหนาแน่นใกล้เคียงมวลเบา และความต้านแรงอัดมีค่าต่ำ เมื่อนำไปใช้งานจริงจะต้องทำการปรับปรุงต่อไป ข้อดีจะสามารถช่วยลดต้นทุน ลดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง และมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผงกระจกพลาสติกใส โดย Tittarelli และคณะ [7] และพลาสติกโพลีเมอร์เหลือใช้จากภาคโรงงานอุตสาหกรรม โดย Byung – Wan และคณะ [8] มาเป็นส่วนผสมกับคอนกรีต เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรม และช่วยลดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม และต่อมาได้มีการทำการศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมเพอร์ไลต์ โดยเมฆาวิ และคณะ [9] เพื่อทดลองหาอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์ ในส่วนผสมให้ได้คอนกรีตที่มีหน่วย

น้ำหนักไม่เกิน 2000 kg/m^3 และมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 300 kg/cm^2 ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้ส่วนผสมที่มีเพอร์ไลต์แทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักลดลง และกำลังต้านทานแรงอัดลดลง ต่อมาได้ทำการศึกษาคอนกรีตมวลเบาเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กและใช้วัสดุเศษโฟมหรือของเสียเทอร์โมเซตติ้งพลาสติก [10], [11] มาเป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบไม่บอบไอน้ำ โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ผลการศึกษาจะพบว่า เส้นใยสามารถเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวได้มีความแข็งแรงสูง และช่วยลดปัญหามลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำผสมเส้นใยไมโครไฟเบอร์ (รูปที่ 1) เพื่อช่วยการเสริมแรงยึดเหนี่ยวของโครงสร้างคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำส่งผลทำให้คอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลตามมาตรฐาน มอก. 2505-2541 ของคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำที่มีส่วนผสมของเส้นใยไมโครไฟเบอร์ จากกระบวนการผลิตมวลเบา นี้ จะมีส่วนผสมของเส้นใยไมโครไฟเบอร์แทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในสัดส่วนร้อยละต่างๆ ดังนี้ 0, 2.5, 5.0, 7.5, และ 10.0 กับคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำทั่วไปภายใต้กระบวนการผลิตภายใต้ความดันไอน้ำ เช่นเดียวกับกระบวนการอบคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำด้วยแรงดัน 12 บาร์ อุณหภูมิ $180 - 190^\circ\text{C}$ เพื่อทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัด กำลังต้านทานแรงดัด ค่าความหนาแน่น และอัตราการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำชั้นคุณภาพ 4 (G4) [11]

2. การทดสอบคุณสมบัติ

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำระหว่างคอนกรีตมวลเบาทั่วไปกับคอนกรีตมวลเบาผสมเส้นใยไมโครไฟเบอร์ (รูปที่ 2) โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1505-2541 [11] เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 1 เส้นใยไมโครไฟเบอร์



รูปที่ 2 คอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำแบบผสมเส้นใยไมโครไฟเบอร์

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของวัตถุดิบผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%โดยน้ำหนัก)
ทราย	67
ยิบซั่ม	1.93
ปูนขาว	15
ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	16
ผงอะลูมิเนียม	0.07

จากตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมของกระบวนการผลิตที่สำคัญของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ มีส่วนประกอบคือ น้ำ ทรายละเอียด ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และใส่ผงอะลูมิเนียม (Aluminium Powder) ลงไปทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับปูนขาว จนเกิดฟองอากาศขนาดเล็กๆ จำนวนมากเป็นรูพรุนไม่ต่อเนื่อง และทำการอบด้วยเตาอบไอน้ำความดันสูงทำให้คอนกรีตมวลเบาที่ได้มีคุณภาพดีสม่ำเสมอ และการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงคุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีในตาราง

ที่ 2 ด้วยเส้นใยไมโครไฟเบอร์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพตามตารางที่ 3

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
SiO ₂	20.61
Al ₂ O ₃	5.03
Fe ₂ O ₃	3.03
CaO	64.89
MgO	1.43
SO ₃	2.70
Na ₂ O	0.22
K ₂ O	0.46
Free lime	0.79
LIO	1.23
คุณสมบัติทางกายภาพ	
Specific gravity	3.15
Blain fineness (cm ² /g)	3,190

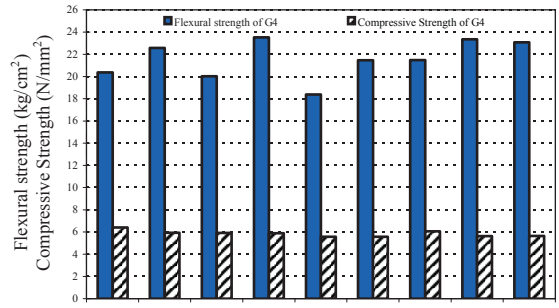
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไมโครไฟเบอร์

ประเภท	ไมโครไฟเบอร์
Specific gravity	1.19
Length (mm)	5.0 – 8.0

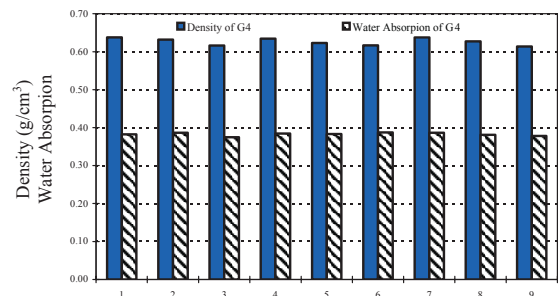
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ทดสอบตามมาตรฐาน มอก.1505 - 2541 ชั้นคุณภาพ 4 จะมีค่ามาตรฐานค่ากำลังต้านทานแรงดัด 18 – 24 kg/cm² และกำลังต้านทานแรงอัด 4.8 – 6.4 N/mm² ดังแสดงในรูปที่ 3 และจากรูปที่ 4 มีค่าความหนาแน่น 0.60 - 0.62 g/cm³ มีอัตราการดูดกลืนน้ำ 0.37 – 0.39 g/cm³ [12]

จากการทดสอบเพื่อหา กำลังต้านทานแรงอัด กำลังต้านทานแรงดัด อัตราการดูดกลืนน้ำ และความหนาแน่น จากรูปที่ 5 – 8 ผลการศึกษาทดสอบคุณสมบัติทาง



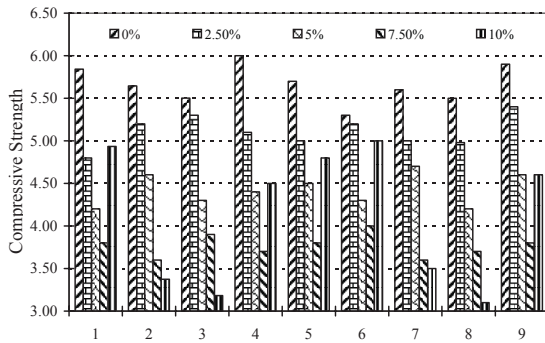
รูปที่ 3 ค่ากำลังต้านทานแรงดัดและค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ G4 ชนิด 0.7



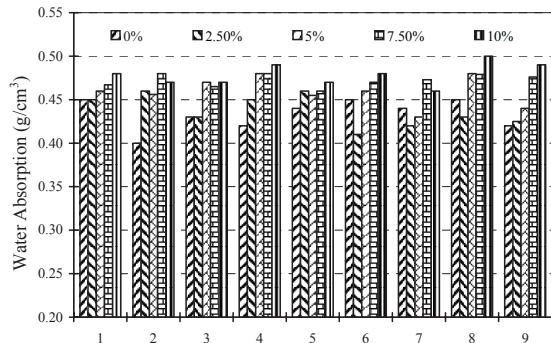
รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่นและอัตราการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ G4 ชนิด 0.7

วิศวกรรมของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่มีเส้นใยไมโครไฟเบอร์ร้อยละ 0, 2.5, 5.0, 7.5, และ 10.0

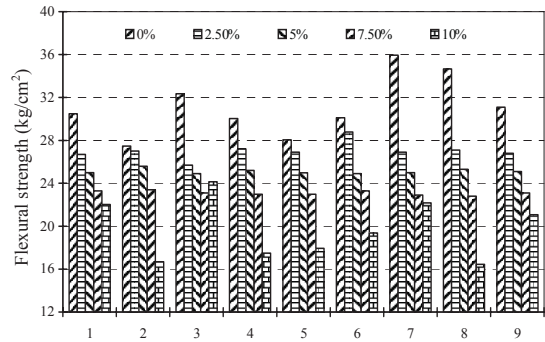
ผลจากการศึกษาทดลอง พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.5 จากรูปที่ 5 มีค่าใกล้เคียงกับการผลิตในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากผลของสัดส่วนของแคลเซียมต่อซิลิกาที่ใกล้เคียงกับการแทนที่ ร้อยละ 0 การเกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่า การแทนที่ในสัดส่วนร้อยละ 5.0, 7.5 และ 10.0 ตามลำดับ กำลังต้านทานแรงดัด จากรูปที่ 8 มีค่าการรับแรงในแนวโน้มเดียวกับกำลังต้านทานแรงอัด สำหรับค่าความหนาแน่น และอัตราการดูดกลืนน้ำเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นใยไมโครไฟเบอร์ที่สูงขึ้น จะมีอัตราการดูดกลืนน้ำ จากรูปที่ 7 มีค่าแปรผันตามสัดส่วนที่สูงขึ้น สำหรับค่าความหนาแน่นจากรูปที่ 8 การแทนที่ด้วยเส้นใยไมโครไฟเบอร์ที่สูงขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นที่ลดลง



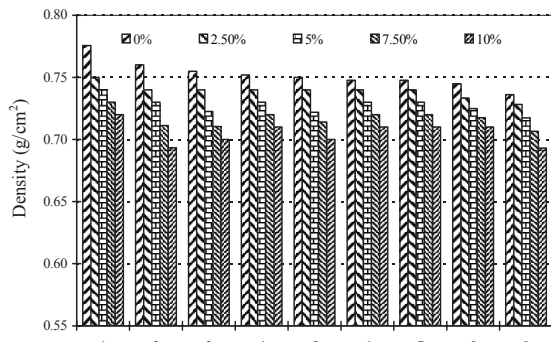
รูปที่ 5 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของมวลเบาอบไอน้ำที่มีส่วนเส้นใยไมโครไฟเบอร์ ร้อยละ 0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0



รูปที่ 7 ค่าอัตราการดูดกลืนน้ำของมวลเบาอบไอน้ำที่มีส่วนผสมของเส้นใยไมโครไฟเบอร์ ร้อยละ 0, 2.5, 5.0, 7.5, และ 10.0



รูปที่ 6 ค่ากำลังต้านทานแรงดัดของมวลเบาอบไอน้ำที่มีส่วนผสมของเส้นใยไมโครไฟเบอร์ร้อยละ 0, 2.5, 5.0, 7.5, และ 10.0



รูปที่ 8 ค่าความหนาแน่นของมวลเบาอบไอน้ำที่มีส่วนผสมของเส้นใยไมโครไฟเบอร์ ร้อยละ 0, 2.5, 5.0, 7.5, และ 1.0

ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าอัตราการดูดกลืนน้ำและความหนาแน่นระหว่างคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำของเส้นใยไมโครไฟเบอร์ที่สัดส่วนร้อยละ 2.5, 5.0, 7.5, และ 10.0 ผลจากรูปที่ 7 – 8 จะพบว่าที่ส่วนผสมร้อยละ 0 และร้อยละ 2.5 มีอัตราการดูดกลืนน้ำที่น้อยกว่าสัดส่วนอื่นๆ เนื่องจากที่ส่วนผสมร้อยละ 2.5 มีการยึดเหนี่ยวระหว่างไมโครไฟเบอร์กับปูนซีเมนต์ได้ดีกว่าการแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนที่สูงขึ้น สำหรับค่าความหนาแน่นต่ำลงตามสัดส่วนการแทนที่ของปูนซีเมนต์ที่สูงมากขึ้นเนื่องจากไมโครไฟเบอร์มีลักษณะเบา และมีความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์ทำให้ความหนาแน่นลดต่ำลง

4. สรุป

การศึกษาทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่มีเส้นใยไมโครไฟเบอร์ร้อยละ 0, 2.5, 5.0, 7.5, และ 10.0 ผลจากการศึกษาทดลอง พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.5 ค่ากำลังต้านทานแรงดัดค่ากำลังต้านทานแรงอัดใกล้เคียงกับการผลิตในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากผลของสัดส่วนของแคลเซียมต่อซิลิกาที่ใกล้เคียงกับการแทนที่ร้อยละ 0 การเกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าการแทนที่ในสัดส่วนร้อยละ 5.0, 7.5 และ 10.0 ตามลำดับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดมีค่าการรับแรงในแนวนอนเดียวกับค่ากำลังต้านทานแรงดัด

สำหรับความหนาแน่นและอัตราการดูดกลืนน้ำ มีค่าแปรผันตามสัดส่วนโดยจะมีค่าความหนาแน่นที่ลดลงในการแทนเส้นใยไมโครไฟเบอร์ที่สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นใยไมโครไฟเบอร์ที่ร้อยละ 5.0, 7.5 และ 10.0 จะมีอัตราการดูดกลืนน้ำสูงขึ้น ผลการทดสอบที่สัดส่วนการแทนที่ร้อยละ 2.5 มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.1505-2541 [11] และผ่านเกณฑ์จะจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7 ผลการศึกษาทดสอบนี้เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตและเพิ่มคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวโครงสร้างของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำโดยใช้เส้นใยไมโครไฟเบอร์

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. S. Poon, et al., "The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong," *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, vol. 50, pp. 293–305, 2007.
- [2] A. Sales, et al., "Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble," *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2362–2370, 2009.
- [3] P. Sukontasukkul, "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel," *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1084-1092, 2009.
- [4] P. Sukontasukkul, "Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber," *Journal of Construction and Building*

Materials, vol. 20, pp. 450–457, 2006.

- [5] P. Sukontasukkul, et al., "Lightweight concrete mixed superfine crumb rubber power part 1: Insulation properties," *Journal of KMUTNB.*, vol. 19, no. 3, Sep – Dec. 2009.
- [6] S. C. G. Kou, et al., "Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes," *Journal of Waste Management*, vol. 29, pp. 621- 628, 2009.
- [7] F. Tittarelli, et al., "Use of GRP industrial by – products in cement based composites," *Journal of Cement & Concrete Composites*, pp. 1-7, 2009.
- [8] J. Byung - Wan, et al., "Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates," *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 2281–2291, 2008.
- [9] เมธาวี ศรีวัฒนาพงศ์ และคณะ, "การศึกษาเบื้องต้นของคอนกรีตมวลเบาผสมเพอร์ไลต์," *การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 5*, หน้าที่ 192 -198, 2552.
- [10] พงษ์พันธ์ สมพลวัฒนา และคณะ, "การศึกษาคอนกรีตมวลเบาเสริมกำลังด้วยเส้นใยเหล็กและใช้วัสดุมวลเบาจากของเสียเทอร์โมเซตติงพลาสติก," *การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 5*, หน้าที่ 214 - 219, 2552.
- [11] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ, มอก.1505–2541, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [12] Y. Ungkoon, et al., "Analysis of Microstructure and Property of Autoclave Aerated Concrete Wall Construction Material," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol.13, no.7, pp. 1103– 1108, December, 2007.