กำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก

Compressive Strength and Water Permeability of Concrete Mixed with Steel Fiber

ลีน่า ปรัก[1] และ ทวีชัย สำราญวานิช[2,*]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี
**Corresponding author; E-mail address: twc@buu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษากำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก โดยใช้คอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.60 ผสมเส้นใยเหล็กที่ 0.5% และ 1.0% โดยปริมาตรของคอนกรีต ทดสอบกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่า การใช้ปริมาณเส้นใยเหล็ก 0.5% โดยปริมาตรของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงที่สุดและอัตราการซึมผ่านน้ำต่ำที่สุดทั้งคอนกรีตที่ใช้ w/b ที่ 0.50 และ 0.60 แต่เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเหล็กสูงมากกว่า 0.5% กลับทำให้กำลังอัดต่ำลงและการซึมผ่านน้ำสูงขึ้น ซึ่งเป็นเพราะว่าปริมาณเส้นใยเหล็กที่มากเกินไปทำให้เกิดมีโพรงช่องว่างระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนและการซึมผ่านน้ำสูงและกำลังอัดคอนกรีตต่ำลง

คำสำคัญ: กำลังอัด, การซึมผ่านน้ำ, คอนกรีต, เส้นใยเหล็ก

Abstract

This research aims to investigate the compressive strength and water permeability of concrete containing steel fiber (SF). The cement concrete with the water to binder ratios (w/b) of 0.50 and 0.60 were used in this study. The SF was added in concrete at the contents of 0.5% and 1.0% by volume of concrete. The compressive strength and the water permeability of concrete were tested at the ages of 7 and 28 days of water curing. From experimental results, it was found that the utilization of 0.5% of SF content resulted in the highest compressive strength and the lowest water permeability for both concretes with the w/b of 0.50 and 0.60. But, when SF content was increased more than 0.5, the compressive strength decreased and water permeability increased. It was because a large amount of SF may induce the voids between fiber and concrete, leading to higher porosity and water permeability and lower compressive strength.

Keywords: compressive strength, water permeability, concrete, steel fiber

1. คำนำ

คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ใช้กันแพร่หลายในงานก่อสร้างของไทย [1, 2] ทั้งนี้คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีทั้งแรงอัดและแรงดึงกระทำซึ่งเกิดจากโมเมนต์ดัด ส่วนใดของโครงสร้างที่รับแรงอัดก็ให้คอนกรีตทำหน้าที่ต้านทานแรงอัด และส่วนใดที่รับแรงดึงก็ให้เหล็กเสริมทำหน้าที่ต้านทานแรงดึง ทั้งนี้เพราะคอนกรีตมีคุณสมบัติต้านทานแรงอัดได้ดีมากแต่มีคุณสมบัติด้อยในด้านรับแรงดึง ส่วนเหล็กเสริมมีคุณสมบัติต้านทานทั้งแรงดึงและแรงอัดได้ดี ดังนั้นโครงสร้างคอนกรีตจะมีความสามารถด้านการรับน้ำหนักที่ดีเมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิดมาใช้รวมกัน แต่ในการใช้งานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการรับน้ำหนักบรรทุกที่มาก โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นด้วย ทำให้มีพื้นที่ใช้สอยน้อยลง ประกอบกับราคาวัสดุก่อสร้างก็มีแนวโน้มว่าจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จึงจำเป็นที่จะต้องหาวัสดุชนิดต่างๆ ที่ราคาไม่สูงมากแต่สามารถช่วยทำให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เพื่อเป็นการลดขนาดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และต้นทุนการก่อสร้างให้เหมาะสม

การใช้วัสดุอื่นผสมเพิ่มเข้าไปในคอนกรีต เช่น เส้นใยเหล็ก (Steel fiber, SF) เพื่อสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดึงและแรงอัดได้ดีขึ้น อีกทั้งการใช้เส้นใยผสมในส่วนผสมคอนกรีตยังช่วยป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวได้ [3-5] โดยในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว เส้นใยจะช่วยป้องกันการแตกร้าวแบบพลาสติก [6] และเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่แข็งตัวแล้ว เส้นใยจะช่วยป้องกันไม่ให้รอยแตกร้าวขนาดเล็กเกิดขึ้น อีกทั้งส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและการแตกร้าวของคอนกรีตอีกด้วย [7-11] อย่างไรก็ตามการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตนั้นไม่ได้คำนึงถึงสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเพียงอย่างเดียว หากโครงสร้างคอนกรีตต้องเผชิญกับการทำลายด้วยปัจจัยต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการทำลาจากสารเคมี การเกิดคาร์บอเนชั่นหรือการทำลาด้วยคลอไรด์เป็นต้น ดังนั้นปัจจัยด้านความคงทนของคอนกรีตจึงต้องคำนึงถึงในการออกแบบด้วย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้เส้นใยเหล็กต่อกำลังอัดและการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีต โดยใช้เส้นใยเหล็กผสมคอนกรีตที่ 0.5

และ 1.0% ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ 0.50 และ 0.60 ทดสอบที่อายุบ่มน้ำ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักของคอนกรีต ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนที่มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร และใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 3.1 รายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มีรายละเอียดในตารางที่ 2 และใช้เส้นใยเหล็กแบบตะขอ (Hook) ความยาว 35 มิลลิเมตร ร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรคอนกรีต

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี (% by weight)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
Silicon dioxide, SiO_2	20.80
Aluminum oxide, Al_2O_3	5.50
Iron oxide, Fe_2O_3	3.16
Calcium oxide, CaO	64.97
Magnesium oxide, MgO	1.06
Sodium oxide, Na_2O	0.08
Potassium oxide, K_2O	0.55
Sulfur trioxide, SO_3	2.96
Loss on ignition, LOI	2.89
คุณสมบัติทางกายภาพ	
Blaine fineness (cm^2/g)	3,550
Specific gravity	3.15

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

Mix id.	w/b	Mix proportion of concrete (kg/m^3)				Steel fiber, SF (% by volume of concrete)
		Cement	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)	
OPCW50		369	185	829	970	-
	0.50	369	185	829	970	0.5
		369	185	829	970	1.0
OPCW60		329	198	829	970	-
	0.60	329	198	829	970	0.5
		329	198	829	970	1.0

2.2 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร จำนวน 8 ก้อนต่อส่วนผสม โดย 6 ก้อนใช้สำหรับทดสอบกำลังอัดในคอนกรีต และ 2 ก้อนใช้สำหรับทดสอบความการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต ตามลำดับ โดยหล่อตัวอย่างตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ตามตารางที่ 2 ในกรณีคอนกรีตผสมเส้นใย เส้นใยเหล็กจะถูกเติมเข้าไปในคอนกรีตในระหว่างขั้นตอนผสมคอนกรีต ทำการถอดแบบภายหลังหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 28 วัน

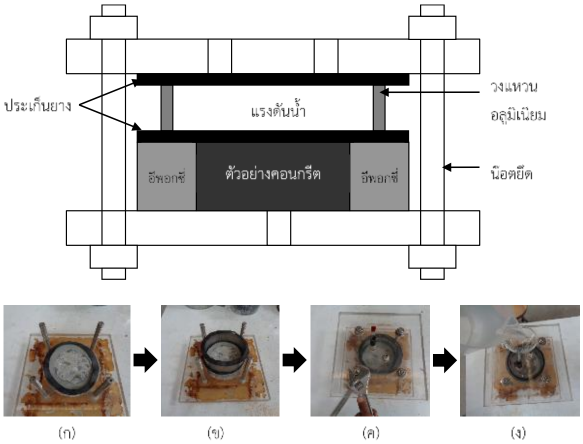
2.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตภายหลังครบอายุบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [12] ASTM C617 [13]

2.4 การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน BS EN 12390-8 [14] เมื่อตัวอย่างครบอายุบ่มตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว น้ตัวอย่างมาตัดหนา 5 เซนติเมตร โดยเลือตัดเอาบริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทรงกระบอก จากนั้นนำตัวอย่างไปหล่อเคลือบด้วยอีพ็อกซี่ดังรูปที่ 1 หลังจากอีพ็อกแข็งตัวแล้ว (ประมาณ 24 ชั่วโมง) จากนั้นทำการประกอบตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับเซลล์ทดสอบซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2 โดยนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาใส่ที่เซลล์หลังจากนั้นทำการขันน๊อตทั้ง 4 ด้าน ให้แน่น โดยต้องใส่ประเก็นยางรองระวังแผ่นอลูมิเนียมเพื่อกันน้ำซึมออกด้านนอก ต่อสายทนแรงดันสูงเข้ากับเซลล์ทดสอบการซึมผ่านน้ำและชุดควบคุมแรงดัน ดังรูปที่ 3 จากนั้นเติมน้ำผ่านวาล์วจนเต็มเซลล์ทดสอบละกระบอกมาตรวัด เริ่มทำการทดสอบโดยใช้แรงดัน 5 บาร์ ต่อเนื่องเป็นเวลา 90 นาที อ่านและบันทึกค่าระดับน้ำทุกๆ 10 นาที

รูปที่ 1 การหล่ออีพอกซี



รูปที่ 2 การประกอบตัวอย่างเข้ากับเซลล์ทดสอบค่าการซึมผ่าน

รูปที่ 3 การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

$$Q = \frac{A \times \Delta V_{water}}{\Delta T} \quad (1)$$

เมื่อ Q คืออัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (m^3/sec), A คือพื้นที่หน้าตัดของกระบอกมาตรวัด (m^2), ΔV คือระดับน้ำในกระบอกมาตรวัดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (m), และ ΔT ช่วงเวลาการบันทึกค่า (sec)

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณเส้นใยเหล็ก (% โดยปริมาตรของคอนกรีต) ที่ใช้ต่อกำลังอัดของคอนกรีต พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กผสมในคอนกรีตที่ 0.5% ให้ค่าทั้งสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% ที่เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากเป็นใช้ปริมาณเส้นใยเหล็กในอัตราที่เหมาะสมทำให้เส้นใยกะจ่ายตัวทั่วเนื้อคอนกรีตได้ดีและเส้นใยไม่จับตัวกันเป็นก้อน ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบมากยิ่งขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ กิตติศักดิ์ นนทเขตขยัน และภาณุมาศ ดวงสิทธิโชค (2548) [15] อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นเป็น 1.0% ส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงและต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยเหล็ก เนื่องจากในปริมาณที่มากเกินไปทำให้เส้นใยเหล็กจับตัวกันเป็นก้อนก่อให้เกิดเป็นโพรงช่องว่างมากขึ้น โดย อภินันท์ ภูชัน และสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา (2548) [16], สราวุฒิ อินทรบ และกิติศักดิ์ ใจตรง (2549) [17] ที่พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเหล็กมากเกินไป การยึดเกาะระหว่างเส้นใยเหล็กและคอนกรีตจะสูญเสียไป เนื่องจากความฝืดระหว่างพื้นผิวเส้นใยเหล็กกับคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูงขึ้น คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตจึงลดลง

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาร จากรูปที่ 3 พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ปริมาณน้ำอิสระ (Free water) ที่เหลืออยู่ในส่วนผสมคอนกรีตมีค่าสูง ส่งผลให้ขนาดโพรงช่องว่างเฉลี่ยและความพรุนของคอนกรีตสูงตามไปด้วย กำลังอัดของคอนกรีตจึงลดลงต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำๆ

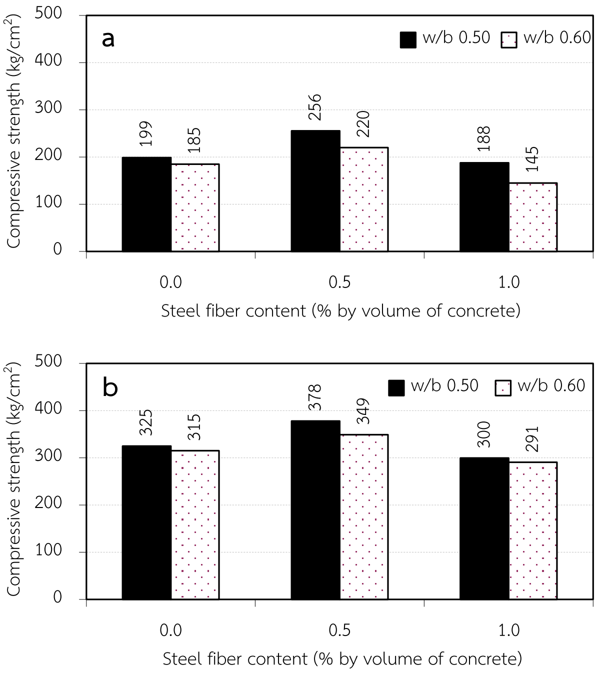
จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาบ่มน้ำ พบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มคอนกรีตนานขึ้นจาก 7 วัน เป็น 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กและไม่ผสมเส้นใยเหล็กสูงขึ้น เนื่องจากการพัฒนาการปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์มีมากขึ้นก่อให้เกิดผลผลิต C-S-H และ C-A-H ที่มีคุณสมบัติเป็นสารยึดประสานมากขึ้นซึ่งเป็นผลดีต่อกำลังของคอนกรีต

3.2 การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

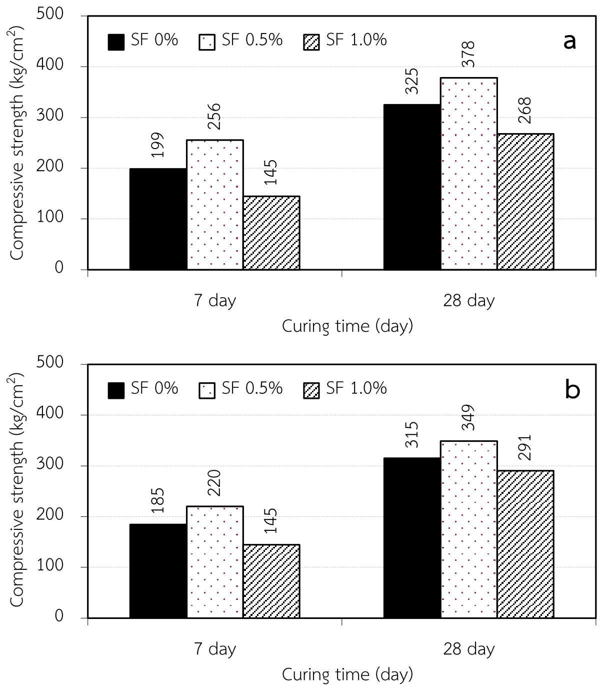
การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแสดงอยู่ในรูปของอัตราการไหลของน้ำต่อเวลาใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 ถึง 7 ตามลำดับ พิจารณาผลกระทบของปริมาณการใช้เส้นใยเหล็กต่อการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต จากรูปที่ 5 และ 6 พบว่า การใช้เส้นใยเหล็กผสมในคอนกรีตที่ 0.5% โดยปริมาตรของคอนกรีต ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมีค่าลดลงต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย แต่เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเหล็กสูงกว่า 0.5% โดยปริมาตรของคอนกรีต (1.0%) อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตเพิ่มขึ้นสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมเส้นใย ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็ก 0.5% นั้นเส้นใยเหล็กมีการกระจ่ายตัวที่ดีเมื่ออัดแน่นคอนกรีตจึงมีโพรงช่องว่างน้อยลง อีกทั้งเส้นใยเลห็กสามารถขัดขวางการซึมผ่านน้ำได้ น้ำจึงซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น อัตราการซึมผ่านน้ำจึงต่ำลง แต่หากใช้ปริมาณเส้นใยเหล็กมากเกินไป การยึดเกาะระหว่างเส้นใยเหล็กและคอนกรีตจะสูญเสียไป อีกทั้งเส้นใยสามารถเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูง การซึมผ่านน้ำจึงสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาบ่มน้ำ จากรูปที่ 5 และ 6 (เปรียบเทียบ a และ b) พบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้นจาก 7 วัน เป็น 28 วัน อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์มากขึ้น ส่งผลให้ความพรุนของคอนกรีตมีค่าลดลง การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตจึงน้อยลง

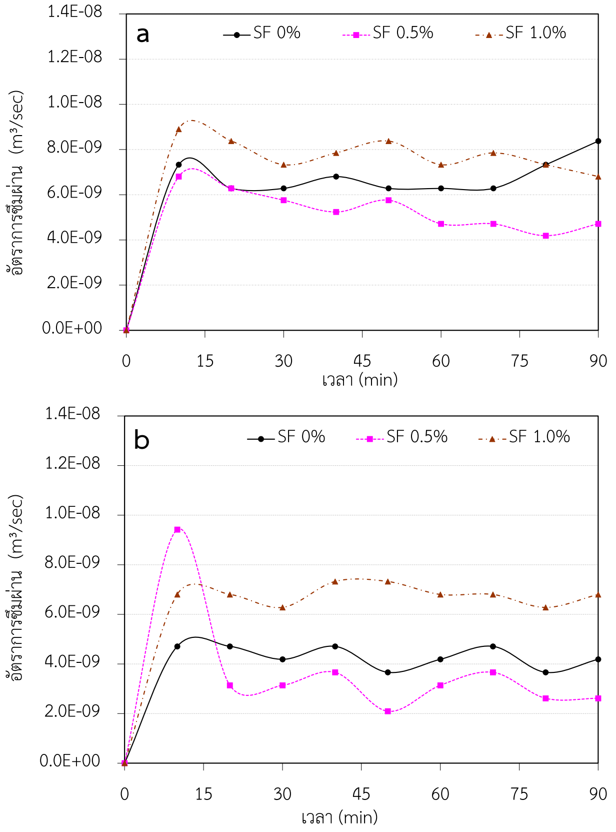
ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ออัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมีแนวโน้มสู้งขึ้น เนื่องจากคอนกรีตมีความพรุนสูงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ การซึมผ่านน้ำผ่านผ่านโพรงช่องว่างในคอนกรีตจึงเกิดขึ้นง่าย ความพรุนในคอนกรีตเกิดจากปริมาณน้ำอิสระที่เหลือในคอนกรีต หากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงจะมีน้ำส่วนเกินมากกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ



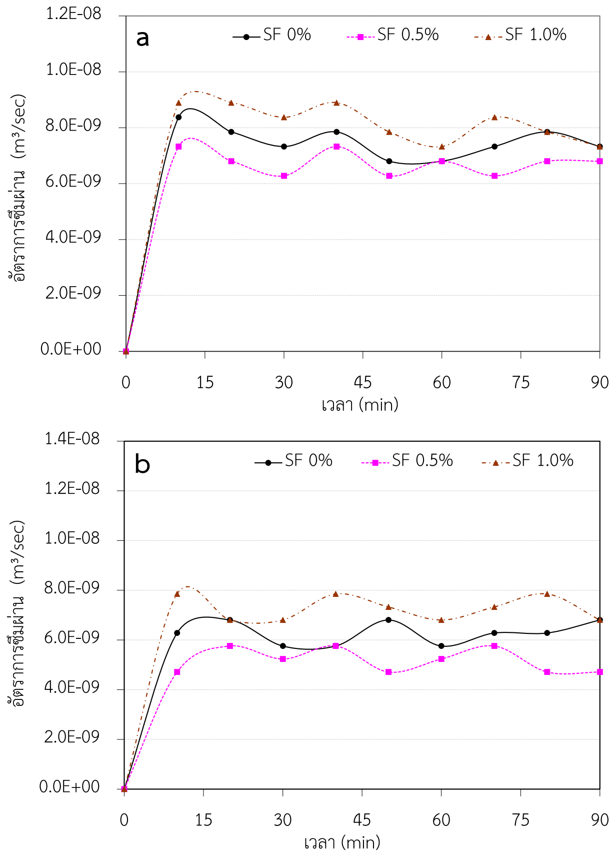
รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, a) ที่อายุบ่มน้ำ 7 วัน และ b) ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน



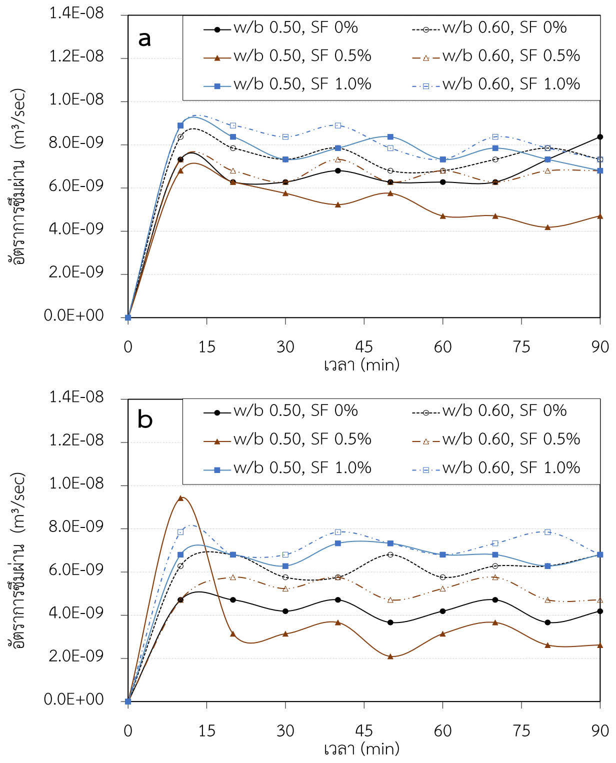
รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, a) ที่ w/b 0.50 และ b) ที่ w/b 0.60



รูปที่ 5 อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ w/b 0.50, a) ที่อายุบ่มน้ำ 7 วัน และ b) ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน



รูปที่ 6 อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ w/b 0.60, a) ที่อายุบ่มน้ำ 7 วัน และ b) ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน



รูปที่ 7 อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก, a) ที่อายุบ่มน้ำ 7 วัน และ b) ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

4. สรุปผล

จากผลการศึกษากำลังรับแรงอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็ก สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. กำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ 0.5% สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย และเมื่อใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นเป็น 1.0% กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมเส้นใย

2. อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กที่ 0.5% ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย และเมื่อใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นเป็น 1.0% อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมเส้นใย

3. เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมเส้นใยเหล็กลดลง แต่อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น

4. เมื่อระยะเวลาการบ่มน้ำนานขึ้นส่งผลทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมเส้นใยเหล็กสูงขึ้น แต่อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมีค่าลดลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 73/2556 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

[1] ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1.

[2] Fajardo, G., Valdez, P. and Pacheco, J. (2009). Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 768–74.

[3] S. Mindess, 1981. Concrete. Prentice-Hall, Inc.

[4] Gizybowski, M. and Shah, S.P. (1990). Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 87(2), pp. 138-148.

[5] Padron, I. and Zollo, R.F. (1990). Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of Portland cement concrete and mortar. *ACI Materials Journal*, 87(4), pp. 327-332.

[6] Sanjuán, M. A. and Moragues, A. (1997). Polypropylene-fibre-reinforced mortar mixes: optimization to control plastic shringkage. *Composites Science and Technology*, 57, pp. 655-660.

[7] Puertas, F. Amat, T. Fernández-Jiménez, A. and Vázquez, T. (2003). Mechanical and durable behavior of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 2031-2036.

[8] Song, P.S., Hwang, S. and Sheu, B.C. (2005). Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 1546-1550.

[9] Antonaci, P. Bocca, P. and Grazzini, A. (2006). In situ determination of toughness indices of fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 39, pp. 283-290.

[10] ปรัชญา จูเหลิ็ง และนัฐภา ภาระศรี (2547). *การศึกษาพลังงานการแตกร้าวของคอนกรีตและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเหล็กผสมไฟเบอร์*. ปริญญานิพนธ์ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี.

[11] ทวีชัย สำราญวานิช อภินันท์ ภู่ชัน และสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา (2550). พฤติกรรมและวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, 30(2) เมษายน-มิถุนายน

[12] ASTM C 39 (2004). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

[13] STM C 617 (2004). Standard Test Method for Capping Cylindrical Concrete Specimens.

[14] BS EN 12390-8 (2009). Testing hardened concrete-Part 8: Depth of penetration of water under pressure.

[15] กิตติศักดิ์ นนทเขตขยัน และภาณุมาศ ดวงสิทธิโชค (2548). *คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและมอร์ต้าร์ที่ผสมไฟเบอร์*. ปริญญานิพนธ์ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี.

[16] อภินันท์ ภูชัน และสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา (2548). *พฤติกรรมและการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมไฟเบอร์*. ปริญญานิพนธ์ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี.

[17] สราวุฒิ อินทรบ และกิติศักดิ์ ใจตรง (2549). *การศึกษาพฤติกรรมของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวที่ผสมเส้นใยเหล็ก*. ปริญญานิพนธ์ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี.