การใช้แผ่นยางแทนกำมะถันเคลือบผิวในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต
Using a Rubber Sheet instead of the Sulfur-capping in the Compressive Strength of Concrete Testing

สาโรจน์ ดำรงศีล*

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ จังหวัดนครปฐม 73170

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้แผ่นยางแทนกำมะถันเคลือบผิวตามมาตรฐาน ASTM C 617 ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัด 180, 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นขอบเขตในการศึกษา ผลการทดสอบ พบว่า การใช้แผ่นยางรองผิวคอนกรีตในการทดสอบกำลังอัด (*fc'(3)*) มีผลให้กำลังอัดเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานที่ใช้กำมะถันเคลือบผิวคอนกรีต (*fc'(2)*) ร้อยละ 7.70 ดังนั้น การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้แผ่นยางรองผิวคอนกรีตจะใช้ตัวคูณปรับแก้ค่ากำลังอัด (Factor) เท่ากับ 0.923 เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดเทียบเท่ากับการทดสอบตามมาตรฐาน สมการความสัมพันธ์ของกำลังอัดคอนกรีตระหว่างตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ *fc'(2)* ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน กับกลุ่มที่ *fc'(3)* ซึ่งใช้แผ่นยางรองผิวคอนกรีต คือ $fc'(2) = 0.88\ fc'(3) + 12.04$ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (*r*) เท่ากับ 0.988

Abstract

This research aims to study the using a rubber sheet instead of the sulfur-capping accordance with ASTM C 617 in the compressive strength of concrete testing. The three of the compressive strength of concrete i.e. 180, 240, and 320 ksc were the scope of study. The test results showed that the concrete with using a rubber sheet (*fc '(3)*) had higher compressive strength than the standard concrete with sulfur-capping (*fc' (2)*) at 7.70%. Therefore, the adjustment factor from using a rubber sheet instead of the sulfur-capping in the compressive strength of concrete testing was 0.923; the compressive strength of concrete is equivalent to the standard testing. The relationship of compressive strength of concrete between *fc '(2)* and *fc' (3)* is $fc'(2) = 0.88\ fc'(3) + 12.04$ with a correlation coefficient (r) of 0.988.

คำสำคัญ : กำลังอัด คอนกรีต

Keywords : Compressive Strength; Concrete

* *ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ Sarojcivil@yahoo.com โทร. 08 4020 4472*

1. บทนำ

กำลังอัดของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติด้านกำลังที่สำคัญสุด เนื่องจากใช้ประกอบการคำนวณโครงสร้างคอนกรีต เช่น อาคาร สะพาน เป็นต้น ส่วนกำลังดัด กำลังดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับกำลังอัดหรือเป็นสัดส่วนกับกำลังอัด กล่าวคือเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นกำลังอื่น ๆ ของคอนกรีตก็จะสูงตามไปด้วย การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้ได้กำลังอัดตามที่ต้องการจะต้องทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีต และควบคุมการทำคอนกรีตตลอดจนการบ่มคอนกรีตให้เป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนการทดสอบกำลังอัดจะเป็นขั้นตอนตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้งาน รูปทรงของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบเพื่อหากำลังอัดของคอนกรีตมี 2 แบบ คือ รูปลูกบาศก์ เป็นมาตรฐานของประเทศอังกฤษ (BS 1881 Part 108) และรูปทรงกระบอก เป็นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM C 192) ทั้งสองรูปแบบเป็นที่ยอมรับและใช้กันทั่วไปในประเทศไทย อย่างไรก็ตาม วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย เสนอแนะการประเมินคุณภาพของคอนกรีตโดยพิจารณาจากกำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ซึ่งถือเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่ใช้จริงในโครงสร้างอาคาร การเก็บตัวอย่างทดสอบกำลังอัดจะกระทำอย่างน้อยวันละครั้ง หรืออย่างน้อยหนึ่งครั้งต่อการเทคอนกรีตที่ติดต่อกันทุก ๆ 50 ลูกบาศก์เมตร (ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีต, 2546) แท่งคอนกรีตทรงกระบอกที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบดังกล่าวนี้เป็นมาตรฐานการทดสอบของประเทศอเมริกา ASTM C 192 ในปัจจุบันการทดสอบกำลังอัดมีแนวโน้มใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กนิยมใช้มาตรฐานตามแบบอเมริกัน หรือของ ว.ส.ท. เป็นหลัก และการคำนวณออกแบบส่วนผสมคอนกรีตส่วนใหญ่ใช้มาตรฐานของอเมริกาเช่นเดียวกัน อีกทั้งตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกมีข้อดีกว่ารูปลูกบาศก์หลายประการ เช่น การหล่อและการทดสอบกระทำในแนวตั้งซึ่งเป็นลักษณะของการเทและรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตในงานจริงทั่วไป จึงถือว่าคอนกรีตทรงกระบอกมีความเหมือนจริงมากกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ทิศทางการเท นอกจากนี้ คอนกรีตรูปทรงกระบอกยังมีผลกระทบจากขนาดของหินน้อยกว่า และการกระจายของหน่วยแรงสม่ำเสมอกว่าคอนกรีตรูปลูกบาศก์ เนื่องจากมีผลกระทบของการยึดที่ปลายด้านบนและด้านล่างของคอนกรีตในระหว่างการทดสอบน้อยกว่า (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551)

การเตรียมตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกก่อนเข้าเครื่องกดเพื่อหาค่ากำลังอัด จะต้องทำผิวด้านรับแรงอัดให้เรียบเพื่อสามารถกระจายแรงอัดได้สม่ำเสมอเต็มพื้นที่หน้าตัดขณะทดสอบ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้วิธีเคลือบผิวด้วยกำมะถัน (Capping) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 617 หากผิวตัวอย่างทดสอบไม่เรียบหรือเอียงเพียง 0.25 มิลลิเมตร อาจทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงได้ถึงร้อยละ 33 และความหนาของ Capping ควรมีความหนาประมาณ 1.5 ถึง 3.0 มิลลิเมตร หาก Capping หนามากเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2540) การทำแท่งคอนกรีตทดสอบให้ผิวเรียบด้วยการเคลือบผิวด้วยกำมะถันก็เพื่อมิให้มีผลกระทบโดยตรงต่อผลการทดสอบกำลังอัดและการประเมินคุณภาพของคอนกรีต จึงมีแนวคิดที่จะใช้แผ่นยางจากล้อรถบรรทุกเก่า

ที่เสื่อมสภาพหมดอายุการใช้งานแล้ว แต่ยังคงมีความยืดหยุ่นตัวมาใช้รองผิวตัวอย่างทดสอบให้สัมผัสกับเครื่องกดก็จะทำให้การทดสอบทำได้สะดวกรวดเร็วขึ้น ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาการใช้แผ่นยางแทนการใช้กำมะถันเคลือบผิวในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ได้จากการใช้แผ่นยางรองผิวคอนกรีตกับกำลังอัดของคอนกรีตที่เคลือบกำมะถันตามมาตรฐาน ASTM C 617 เพื่อให้ได้ตัวคูณปรับแก้ค่ากำลังอัด (Factor) ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตลอดจนสามารถนำยางล้อรถบรรทุกเก่าที่เสื่อมสภาพหมดอายุการใช้งานแล้วกลับมาใช้ประโยชน์ได้ งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตศึกษาการใช้แผ่นยางเป็นวัสดุถ่ายแรงเปรียบเทียบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกโดยใช้แผ่นยางนีโอพรีนรองแท่งคอนกรีตเป็นวัสดุถ่ายแรงกับวิธีเคลือบด้วยกำมะถัน (ปรีดา สาดตระกูล-วัฒนา, 2538) ทดสอบภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ พบว่า วิธีใช้ยางนีโอพรีนความแข็ง 50 กดเยื้องศูนย์กับวิธีเคลือบด้วยกำมะถันกดปกติไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับวิธีใช้ยางนีโอ-พรีนความแข็ง 60 กดเยื้องศูนย์และกดปกติกับวิธีเคลือบด้วยกำมะถันกดปกติไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สมการความสัมพันธ์ถดถอยเส้นตรงสำหรับวิธีใช้ยางนีโอพรีนความแข็ง 50 และ 60 กับวิธีเคลือบด้วยกำมะถัน คือ SN50 = 0.8960N50+20.5055 และ SN60 = 0.8996N60 +20.7555 กับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.9815 และ 0.9752 ตามลำดับ งานศึกษาวิจัยเพื่อเป็นทางเลือกในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ทำได้สะดวกรวดเร็วและไม่มีกลิ่นกำมะถันรบกวน โดยการประยุกต์ใช้กระดาษชานอ้อยแทนกำมะถันสำหรับปิดหัวแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก (มนัส อนุศิริ, 2549) ใช้กระดาษชานอ้อยหนา 10 มิลลิเมตร ตัดเป็นชิ้นขนาด 20x20 เซนติเมตร วางบนหัวคอนกรีตรูปทรงกระบอกด้านที่ไม่เรียบ ผลจากการศึกษา พบว่า คอนกรีตทดสอบที่ใช้กระดาษชานอ้อยปิดหัวมีกำลังอัดเฉลี่ย 268 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนคอนกรีตทดสอบที่ใช้กำมะถันปิดหัวซึ่งเป็นข้อกำหนดมาตรฐานมีกำลังอัดเฉลี่ย 286 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีความแตกต่างกันประมาณร้อยละ 6 ดังนั้น จึงสามารถประยุกต์ใช้กระดาษชานอ้อยแทนกำมะถันสำหรับปิดหัวแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกได้ โดยเสนอแนะให้ใช้ตัวคูณปรับค่าเท่ากับ 1.06 และงานวิจัยด้านการใช้แผ่นยางพาราเป็นวัสดุส่งถ่ายแรงในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตแทนการใช้กำมะถันเหลวเคลือบปลาย (ประชุม คำพุฒ, 2550) โดยออกแบบสูตรผสมสำหรับการขึ้นรูปยางพาราเป็น 4 สูตร และขึ้นรูปแผ่นยางด้วยวิธีอัดร้อน ผลการทดสอบ พบว่า แผ่นยางสูตรที่ให้ความต้านทานกำลังอัดใกล้เคียงกับกำมะถันมากที่สุด คือ สูตรยางแท่ง STR 20 ใช้ผงเขม่าดำเกรด N 330 ผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีความต้านทานกำลังอัดสูงกว่าใช้กำมะถันร้อยละ 7 แสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาสูตรยางพาราเพื่อใช้เป็นวัสดุรองปลายแท่งตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบกำลังอัดได้ต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 แผนการทดสอบ

แผนการทดสอบแสดงเป็นแผนภูมิในรูปที่ 1

รูปที่ 1 แผนการทดสอบ

2.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

2.2.1 คอนกรีต เป็นคอนกรีตผสมเสร็จที่มีกำลังอัด 180, 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทดสอบจากตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน กำหนดให้ค่าความยุบตัวของคอนกรีตอยู่ในช่วง 7.5-2.5 เซนติเมตร ส่วนผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต

ชนิดของคอนกรีต*	w/c	วัสดุ (กก./ลบ.ม.)			สารผสม (ลิตร)
		ปูน	ทราย	หิน	
fc'180	0.65	260	885	1,105	1.30
fc'240	0.54	315	840	1,105	1.58
fc'320	0.43	400	770	1,105	2.00

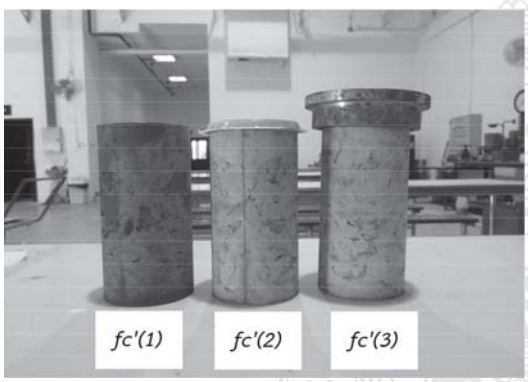
หมายเหตุ: **fc'180*, *fc'240,* และ *fc'320* : กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 180, 240 และ 320 กก./ซม.2 ตามลำดับ

2.2.2 แผ่นยางรองผิวคอนกรีต เป็นยางล้อรถบรรทุกเก่าที่เสื่อมสภาพหมดอายุการใช้งานแล้ว ตัดจากบริเวณแก้มล้อ (ด้านข้างล้อ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 108 มิลลิเมตรและมีความหนาประมาณ 15 มิลลิเมตร มีความแข็ง (Shore A) เท่ากับ 65 จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ลักษณะแผ่นยางรองผิวคอนกรีตแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 2 แผ่นยางรองผิวคอนกรีต

2.3 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัด เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 39 ใช้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C 109 หลังจากหล่อตัวอย่างทดสอบและนำไปบ่มจนกระทั่งครบอายุทดสอบที่ 28 วัน เตรียมตัวอย่างทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ไม่เคลือบผิว *fc'(1)* กลุ่มที่เคลือบผิวด้วยกำมะถันตามมาตรฐาน *fc'(2)* และกลุ่มที่ใช้แผ่นยางรองผิว *fc'(3)* ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตทั้ง 3 กลุ่ม จำนวนกลุ่มละ 50 ก้อน แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต

ชนิดของคอนกรีต	กำลังอัด, กก./ซม.2 (ร้อยละ)		
	fc'(1)	*fc'(2)*	*fc'(3)*
fc'180	168.7	211.6	232.3
	(79.7)	(100)	(109.7)
fc'240	212.9	261.1	271.0
	(81.5)	(100)	(103.7)
fc'320	264.3	355.5	390.0
	(74.3)	(100)	(109.7)

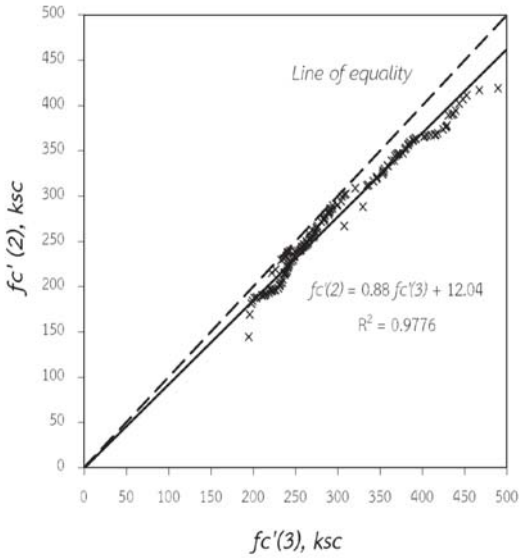
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าตัวอย่างทดสอบที่เคลือบผิวด้วยกำมะถันตามมาตรฐานของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(2)* มีกำลังอัดเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตไว้ ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ไม่ใช้วัสดุใด ๆ เคลือบผิวของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(1)* มีกำลังอัดเฉลี่ยต่ำกว่าร้อยละ 18.5 ถึงร้อยละ 25.7 เมื่อเทียบกับกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(2)* สอดคล้องกับรายงานผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ผิวตัวอย่างทดสอบไม่เรียบอาจส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงร้อยละ 33 (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2540) ขณะที่ตัวอย่างทดสอบที่ใช้แผ่นยางรองผิวของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(3)* มีกำลังอัดเฉลี่ยสูงกว่าร้อยละ 3.7 ถึงร้อยละ 9.7 เมื่อเทียบกับกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(2)* หรือมีกำลังอัดเฉลี่ยสูงกว่าร้อยละ 7.7 เมื่อเทียบกับกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(2)* เนื่องจากความยืดหยุ่นตัวของแผ่นยางรองผิวคอนกรีตทำให้แรงอัดตั้งฉากกับผิวตัวอย่างทดสอบได้ดีและช่วยถ่ายแรงได้สม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ได้จากการใช้แผ่นยางรองผิวในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ใช้แผ่น

ยางพาราเป็นวัสดุถ่ายแรงซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงกว่าใช้กำมะถันร้อยละ 7 (ประชุม คำพุฒ, 2550) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำยางล้อรถบรรทุกเก่าที่เสื่อมสภาพหมดอายุการใช้งานแล้วเป็นแผ่นยางรองผิวแทนกำมะถันเคลือบผิวในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้ตัวคูณปรับแก้ค่ากำลังอัด (Factor) เท่ากับ 0.923 เพื่อให้ได้ค่าเทียบเท่ากับผลการทดสอบตามมาตรฐาน หรือเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (1)

$$fc'(2) = 0.923\ fc'(3) \qquad (1)$$

3.2 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดระหว่างตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ fc'(2) กับ fc'(3)

ความสัมพันธ์ของกำลังอัดระหว่างตัวอย่างทดสอบของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(2)* กับกลุ่มที่ *fc'*(3) ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์หาได้จากการประมาณค่าฟังก์ชันเชิงวิเคราะห์ โดยเลือกรูปแบบเชิงเส้นหรือเส้นโค้งที่ดีที่สุดให้เข้ากับชุดข้อมูล ในงานวิจัยนี้ใช้ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ *fc'(2)* และกลุ่มที่ *fc'*(3) จำนวน 300 ก้อน ซึ่งเปรียบเสมือนข้อมูลกำหนดจุดพิกัดเป็นคู่ ๆ จำนวน 150 คู่ เรียงลำดับจากค่าน้อยไปหามาก พบว่า การประมาณค่าฟังก์ชันแบบถดถอย (Regression) โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares regression) เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งเป็นข้อมูลมีจำนวนมากกว่าจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าจากการปรับเส้นโค้ง และได้ความสัมพันธ์ของกำลังอัดคอนกรีตระหว่างตัวอย่างทดสอบของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(2)* กับกลุ่มที่ *fc'*(3) ในรูปของเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดระหว่างตัวอย่างทดสอบของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(2)* กับกลุ่มที่ *fc'*(3)

จากรูปที่ 4 จะเห็นผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกระจายตัวเหมาะกับเส้นตรง และกระจายตัวใกล้กับเส้นเทียบเท่า (Line of Equality) ซึ่งหมายถึงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(2)* กับกลุ่มที่ *fc'(3)* มีค่าใกล้เคียงกัน ระดับความสัมพันธ์ของเส้นตรงระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(2)* กับกลุ่มที่ *fc'(3)* ซึ่งเรียกว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (*r*) เท่ากับ 0.988 ($r = \sqrt{R^2}$) โดยคอนกรีตที่ออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังอัดเท่ากับ 180 ถึง 320 กก./ซม.^{2} ภายใต้ขอบเขตการศึกษาแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

$$fc'(2) = 0.88\ fc'(3) + 12.04 \qquad (2)$$

4. สรุป

จากการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ ดังนี้

4.1 กลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ใช้กำมะถันเคลือบผิวคอนกรีตในการทดสอบกำลังอัด *fc'(2)* ซึ่งเป็นกลุ่มที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่ออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ขณะที่กลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ไม่ใช้วัสดุใด ๆ เคลือบผิวคอนกรีต *fc'(1)* มีกำลังอัดเฉลี่ยลดลงต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานร้อยละ 18.50 ถึงร้อยละ 25.70 เนื่องจากผิวตัวอย่างทดสอบที่ไม่เรียบหรือผิวตัวอย่างทดสอบมีความลาดเอียง

4.2 การใช้แผ่นยางรองผิวในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่ *fc'(3)* มีกำลังอัดเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานที่ใช้กำมะถันเคลือบผิวคอนกรีต *fc'(2)* ร้อยละ 7.70 เนื่องจากความยืดหยุ่นตัวของแผ่นยางรองผิวคอนกรีตทำให้แรงอัดตั้งฉากกับผิวตัวอย่างทดสอบได้ดี และช่วยถ่ายแรงได้สม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

4.3 มีความเป็นไปได้ที่จะนำยางล้อรถบรรทุกเก่าที่เสื่อมสภาพหมดอายุการใช้งานแล้วเป็นแผ่นยางรองผิวแทนกำมะถันเคลือบผิวในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้ตัวคูณปรับแก้ค่ากำลังอัด (Factor) เท่ากับ 0.923 เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดเทียบเท่ากับการทดสอบตามมาตรฐาน โดยเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ คือ $fc'(2) = 0.923\ fc'(3)$

4.4 สมการความสัมพันธ์ของกำลังอัดคอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากับ 180 ถึง 320 กก./ซม.^{2} ระหว่างตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ *fc'(2)* ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน กับกลุ่มที่ *fc'(3)* ซึ่งใช้แผ่นยางรองผิวคอนกรีต คือ $fc'(2) = 0.88\ fc'(3) + 12.04$ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.988

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องทุก ๆ ท่านที่มีส่วนช่วยในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. **ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต**. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, พิมพ์ครั้งที่ 2, พ.ศ. 2546.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2540. **คอนกรีตทรงกระบอกหรือรูปทรงลูกบาศก์**. โยธาสาร. ปีที่ 9, ฉบับที่ 1, หน้า 20-21.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2551. **การเลือก การทดสอบและความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตรูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก.** วารสารคอนกรีต. ฉบับที่ 3, หน้า 27-30.

ประชุม คำพุฒ. 2550. **การใช้แผ่นยางพาราเป็นวัสดุ ส่งถ่ายแรงในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.** วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. มหาวิทยาลัยบูรพา, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1 หน้า 3-9.

ปรีดา สาดตระกูลวัฒนา. 2538. **การใช้แผ่นยางเป็นวัสดุถ่ายแรง.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มนัส อนุศิริ. 2549. **การประยุกต์ใช้กระดาษชานอ้อยแทนกำมะถันสำหรับปิดหัวแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11. จังหวัดภูเก็ต. หน้า 167.

American Society for Testing and Materials, ASTM. Annual Book of ASTM Standard, 2001, Volume 4.01 and 4.02.

American Society for Testing and Materials, 2001. **ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.** Annual Book of ASTM Standard, 2001, pp. 18-22. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials, 2001. **ASTM C 192: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.** Annual Book of ASTM Standard, 2001, pp. 120-127. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials, 2001. **ASTM C 617-98: Standard Practice for Capping for Cylindrical Concrete Specimens.** Annual Book of ASTM Standard, 2001, pp. 305-309. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials, 2010. **ASTM D 2240-05 (2010): Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness.** ASTM International, West Conshocken, PA.

British Standard Institute, 1983. BS 1881: Part 108. **Method of Making Test Cube from Fresh Concrete.** London.