ผลของการใช้กรวดแม่น้ำโขงเป็นมวลรวมหยาบที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต
Effect of gravel from the Mekong River as coarse aggregate to concrete properties

สิทธิรักษ์ แจ่มใส[1*], ภาคิณ ลอยเจริญ[2]
Sittiruk Jamsai[1*], Phakin Loyjaroen[2]

Received: 15 July 2020 ; Revised: 7 August 2020 ; Accepted: 10 September 2020

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงเป็นมวลรวมหยาบ ผลการศึกษาคุณสมบัติของกรวดพบว่า ค่าดัชนีความแบน ค่าดัชนีความยาว และกำลังต้านทานการสึกกร่อน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตที่ทนต่อการขัดสี ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตพบว่า การใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตลดลงร้อยละ 7 และร้อยละ 4 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปและใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงตามลำดับ ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนพบว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงร้อยละ 27 และร้อยละ 30 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปและใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงต้านการเฉือนจากการขัดกันของมวลรวมที่ใช้กรวดต่ำกว่ากรณีที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบเพราะมีพื้นผิวที่เรียบกว่า อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบยังมีกำลังต้านทานแรงเฉือนมากกว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ต้องการในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตที่ไม่อัดแรงประมาณ 3 เท่า

คำสำคัญ: คอนกรีต กรวดแม่น้ำโขง มวลรวมหยาบ กำลังต้านทานแรงเฉือน

Abstract
The aim of this research was to study the properties of concrete made using the gravel from the Mekong River as a coarse aggregate. The results indicated that gravel properties ; Flakiness Index, Elongation Index and abrasion resistance of concrete were within the standards for general concrete and abrasion resistant concrete. The results of the compressive strength test of concrete showed that the use of gravel as a coarse aggregate instead of limestone causes the compressive strength of concrete to be reduced by 7% and 4% for concrete used in general structure and prestressed concrete respectively. The results of shear strength tests showed that concrete using gravel as a coarse aggregate instead of limestone reduces shear resistance by 27% and 30% for concrete used in general structure and prestressed concrete, respectively. Shear resistance from aggregates interlocking of concrete using gravel was lower than limestone used as a coarse aggregate because of a smoother surface. However, concrete using gravel as coarse aggregate has a shear strength approximately 3 times greater than concrete required in the design of non-prestressed concrete building elements.

Keywords: Concrete, Gravel from Mekong River, Coarse aggregate, Shear strength

[1] อาจารย์ สาขาวิชาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร อ.เมือง จ.สกลนคร 47000
[1] Lecturer, Faculty of Industrial Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University, Mueang District, Sakon Naknon, 47000.
* Corresponding author ; Dr. Phakin Loyjaroen, Tel: 081-393-5982, E-mail: phakinjob@gmail.com

บทนำ

งานก่อสร้างจากอดีตถึงปัจจุบันนิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากคอนกรีตมีเนื้อสม่ำเสมอแน่น ทึบน้ำ ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและแรงเสียดสีต่างๆ ได้ดี อีกทั้งมีปริมาตรค่อนข้างคงที่ หดหรือขยายตัวน้อยเมื่อสิ่งแวดล้อมหรืออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป การเลือกส่วนผสมที่ถูกต้องจะทำให้ได้คอนกรีตที่เหมาะสมกับงานที่ได้ออกแบบไว้ การที่จะได้คอนกรีตที่มีคุณภาพนั้น มวลรวมจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม คอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปมีส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ น้ำ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบที่นิยมใช้กันทั่วไปคือหินปูน ส่วนมวลรวมละเอียดจะใช้ทราย มวลรวมจะต้องเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ โดยปกติคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตรจะมีส่วนผสมของมวลรวมอยู่ประมาณร้อยละ 70-80 (ดนุพล ตันนโยภาส และคณะ, 2551) ทั้งนี้ด้วยเหตุผลจากราคาของมวลรวมที่ถูกกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างลงได้

การผลิตคอนกรีตสำหรับใช้ในงานก่อสร้างในบริเวณพื้นที่ริมแม่น้ำโขงส่วนใหญ่จะมีการนำกรวดแม่น้ำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบทดแทนหินปูนในส่วนผสมของคอนกรีต (สุมิตร ประทุมวงศ์ และคณะ, 2528) เนื่องจากหาได้ง่ายและช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยลดลง อีกทั้งยังเป็นการนำเอาวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นมาใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นควรมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีกรวดแม่น้ำในพื้นที่ดังกล่าวเป็นส่วนผสมมวลรวมหยาบแทนหินปูน เนื่องจากความสามารถในการต้านทานแรงอัดประลัยและกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของคอนกรีต เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนี้คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดประลัยที่ดี ยังมีความคงทนและต้านทานการแตกร้าวได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยต่ำ (Weerheijm, 2013)

มวลรวมหยาบมีลักษณะของมวลรวมเป็นหินย่อย (หรือหินปูน) หรือกรวดแม่น้ำ ที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 อย่างน้อยร้อยละ 20 แต่อนุโลมให้หินที่มีขนาดตั้งแต่ 9.5-37.5 มิลลิเมตรเป็นมวลรวมประเภทนี้ด้วย (บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, 2553) โดยส่วนใหญ่มวลรวมหยาบมักจะเป็นหินย่อยที่ได้จากการระเบิดภูเขาแล้วนำมาย่อยด้วยเครื่องบดย่อยอีกครั้งหนึ่ง

ความสามารถรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญและควรคำนึงเป็นอันดับแรก ดังนั้นคุณสมบัติของมวลรวมจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องมีการศึกษา คุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวมประกอบด้วย กำลังและความแข็งแรงของมวลรวม (Crushing strength) ความทนทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion resistance) ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Resistance to the change in temperature) ความพรุนและการดูดซึมน้ำ (Porosity and absorption) ความคงตัวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical stability) ลักษณะรูปร่างและผิวของมวลรวม (Particle shape and surface texture) ความสะอาด (Cleanliness) และความลดหลั่นของขนาดหรือขนาดส่วนคละ (Gradation) (Neville, 1981)

ผลการศึกษาในอดีตพบว่ากรวดแม่น้ำสามารถนำมาใช้แทนหินปูนในส่วนผสมของมวลรวมหยาบในคอนกรีตได้ ทั้งคอนกรีตกำลังปกติ (อัศวิน คุณาแจ่มจรัส, 2549) และคอนกรีตกำลังสูง (รพีพัฒน์ โชควิวัฒนวนิช, 2540) และ (ธนบดี อินทรเพชร และชูชัย สุจิวรกุล, 2553) โดยการนำกรวดแม่น้ำไปใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนในจังหวัดที่มีแหล่งวัสดุกรวดอยู่แล้ว จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตได้ร้อยละ 15 (ดำรงค์ หอมดี, 2545) แต่การศึกษาผลกระทบด้านกำลังของคอนกรีตที่นำกรวดแม่น้ำมาใช้เป็นส่วนผสมของมวลรวมหยาบส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาผลกระทบด้านกำลังต้านทานแรงอัด ซึ่งเป็นความสามารถหลักที่เด่นชัดของคอนกรีต แต่พฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกออกแบบในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป นอกจากค่ากำลังอัดประลัยสูงสุดแล้ว ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตก็ถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะศึกษากำลังต้านทานแรงอัดประลัยและกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงผสมเป็นมวลรวมหยาบ เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้หินปูนผสมเป็นมวลรวมหยาบ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความเหมาะสมด้านรูปร่างและความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนของกรวดแม่น้ำเปรียบเทียบกับหินปูน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่กรวดแม่น้ำด้อยกว่าหินปูนในการนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างกรวดแม่น้ำโขงกับหินปูนในการนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต

2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการต้านทานแรงอัดและแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงเป็นส่วนผสมและเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นส่วนผสม

วิธีการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยจะเริ่มจากการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบ ได้แก่ กรวดแม่น้ำโขงและหินปูน โดยจะดำเนินการทดสอบหาดัชนีความแบน (Flakiness index)

ตามมาตรฐาน BS812 *:* Section 105.1 *:* 1989 Flakiness index of coarse aggregate (British Standard Institution, 1989) และดัชนีความยาว (Elongation index) ตามมาตรฐาน BS 812*:* Section 105.2 *:* 1990 Elongation index of coarse aggregate (British Standard Institution, 1990) เพื่อให้ทราบว่ามวลรวมมีรูปทรงเหมาะสมที่จะใช้เป็นมวลรวมหยาบสำหรับผสมคอนกรีตหรือไม่ เนื่องจากกรวดแม่น้ำโดยทั่วไปจะมีรูปทรงผสมผสานกันหลายรูปแบบ ทั้งแบบกลม ยาว เรียว และแบนเรียบ เป็นต้น ดังนั้นการทดสอบดังกล่าวจะช่วยคัดกรองคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม โดยการทดสอบหาค่าดัชนีความแบนจะทดสอบหินหรือกรวดที่ผ่านการคัดแยกขนาดที่เหมาะสม โดยใช้เครื่องมือทดสอบความแบน (Metal thickness gauge) โดยดัชนีความแบน (FI) มีค่าเท่ากับร้อยละของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรวมของตัวอย่างที่ผ่าน Thickness gauge ต่อน้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมด และการทดสอบหาค่าดัชนีความยาว จะทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบความยาว (Metal length gauge) โดยค่าดัชนีความยาว (EI) สามารถหาค่าได้จากค่าร้อยละของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรวมของตัวอย่างที่ค้าง Metal length gauge ต่อน้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมด

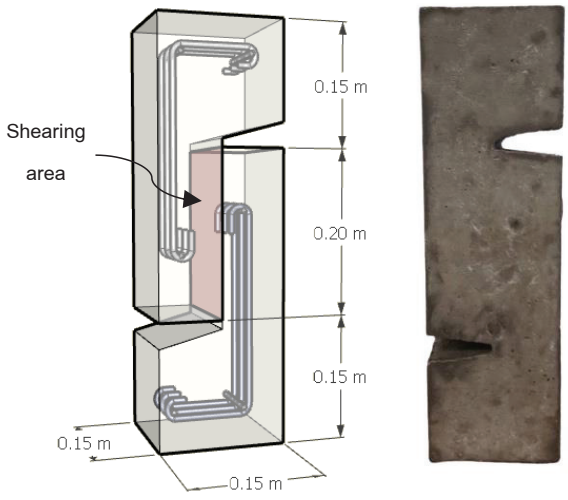
จากนั้นจะดำเนินการทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนของกรวดแม่น้ำและหินปูน ตามมาตรฐาน ASTM C 131 (Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine) (ASTM C 131, 2001) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ต่อน้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดก่อนทดสอบ ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 35 จึงจะเหมาะในการนำมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีต (CPAC, 2020)

ขั้นตอนต่อไป จะเป็นการทดสอบทางกล (Mechanical tests) ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงและหินปูนผสมเป็นมวลรวมหยาบ ในงานวิจัยนี้ จะดำเนินการทดสอบกำลัง (Strength) ของคอนกรีตโดยวิธีการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ (Loading methods) ซึ่งจะทดสอบพฤติกรรมทางกลที่สำคัญของคอนกรีต 2 ประเภท คือ การทดสอบแรงกดอัด (Compression test) และการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งสองประเภทถูกนำไปใช้ในงานออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมากที่สุด

การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C192 Standard method of making and curing concretes test specimens in the laboratory (ASTM C 192, 2014) โดยจะทำการหล่อตัวอย่างทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบ 6 ชุด และใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ 6 ชุด โดยคอนกรีตจะถูกออกแบบส่วนผสมตามทฤษฎีให้มีค่ากำลังอัดประลัย 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับเป็นตัวแทนของคอนกรีตกำลังปกติที่ใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดเล็กทั่วไป และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง (นเรศ พันธราธร, 2543) หลังจากนั้นจะดำเนินการกดทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างผ่านเครื่องกดทดสอบ (Compression machine) ตามมาตรฐาน ASTM C39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C39, 2020)

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ออกแบบใช้สำหรับทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดประลัย สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบ จะมีอัตราส่วนผสมโดยปริมาตร (ปูน: ทราย: หิน) เป็น 1: 2.25*:* 3.71 และ 1: 2.67: 3.29 ตามลำดับ และสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบ จะมีอัตราส่วนผสมโดยปริมาตร (ปูน: ทราย: หิน) เป็น 1: 1.64: 3.01 และ 1: 2.67: 3.29 ตามลำดับ

การทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นส่วนผสมของมวลรวมหยาบ เริ่มจากการออกแบบตัวอย่างทดสอบโดยใช้หลักการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) เนื่องจากแรงเฉือนในกรณีนี้เกิดจากการกระทำโดยตรงต่อแท่งตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างทดสอบถูกออกแบบให้ระนาบการเฉือนมีระนาบเดียว (Single shear) โดยให้แรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบมีระยะเยื้องศูนย์ที่น้อยที่สุด เพื่อให้แนวแรงที่กระทำตรงกับระนาบการเฉือนให้มากที่สุด เพื่อกำจัดปัญหาความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้เนื่องจากผลของแรงดัดที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ ลักษณะของตัวอย่างทดสอบแสดงดัง Figure 1(a)



(a) Direct shear test sample

(b) Direct shear test on UTM

Figure 1 Direct shear test

ตัวอย่างทดสอบถูกออกแบบโดยให้มีพื้นที่รับแรงเฉือนตรงขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ลึก 20 เซนติเมตร เนื่องจากถูกจำกัดที่ขนาดของแบบหล่อ ซึ่งได้ประยุกต์ใช้แบบหล่อขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ลึก 50 เซนติเมตร ที่ใช้ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีต มาใช้ในการทดสอบแทน ขนาดของพื้นที่รับแรงเฉือนจึงถูกจำกัดที่ความยาวของแบบหล่อ เพื่อป้องกันการวิบัติในบริเวณอื่นที่ไม่ใช่บริเวณพื้นที่รับแรงเฉือนที่ต้องการจึงได้ออกแบบชิ้นส่วนคอนกรีตแต่ละส่วนให้มีการเสริมเหล็ก โดยใช้เหล็ก 3-RB 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กเสริมเพื่อป้องกันการวิบัติในบริเวณอื่นนอกเหนือจากบริเวณพื้นที่รับแรงเฉือน (ภาคิณ ลอยเจริญ, 2544) ดังแสดงใน Figure 1 ตัวอย่างทดสอบจะมีชุดละ 5 ตัวอย่าง ตามประเภทของมวลรวมหยาบและกำลังอัดประลัยออกแบบ

การทดสอบทำได้โดยนำตัวอย่างทดสอบไปให้แรงกดโดยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ดังภาพ Figure 1(b) การติดตั้งตัวอย่างในเครื่องทดสอบ จะต้องระมัดระวังเรื่องการเยื้องศูนย์ของแรงที่จะกระทำผ่านหน้าตัดรับแรงเฉือนให้มากที่สุด โดยการจัดวางตัวอย่างให้อยู่กึ่งกลางแท่นกดทั้งบนและล่าง ตั้งน้ำหนักกดให้มีอัตราการกดคงที่ ประมาณ 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ค่าแรงกดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องกดทดสอบจะเป็นค่าแรงเฉือนประลัยของพื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน ดังนั้นกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตจึงมีค่าเท่ากับแรงเฉือนประลัยหารด้วยพื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน ค่าที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสมการทำนายกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตแบบไม่อัดแรงและไม่มีการเสริมเหล็กผ่านหน้าตัดรับแรงเฉือนจาก ACI-318 (ACI Committee 318-19, 2019) ดังสมการที่ (1)

$$V_c = 0.53 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (1)$$

เมื่อ V_c คือกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต (กิโลกรัม), f'_c คือกำลังต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร), b และ d คือความกว้างและความลึกของพื้นที่หน้าตัดต้านทานแรงเฉือน (เซนติเมตร) ตามลำดับ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาคุณสมบัติของกรวดแม่น้ำโขงเปรียบเทียบกับหินปูน สำหรับใช้เป็นส่วนผสมมวลรวมหยาบของคอนกรีต สามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

ผลการศึกษาดัชนีความแบนและดัชนีความยาว

จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness index) ของกรวดแม่น้ำและหินปูนใน Table 1 พบว่ากรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความแบนร้อยละ 22.35 หินปูนมีค่าดัชนีความแบนร้อยละ 5.53 ซึ่งกรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความแบนสูงกว่าหินปูนร้อยละ 16.82 (ตามมาตรฐาน BS 882 กล่าวว่า หินย่อยที่มีดัชนีความแบนน้อยกว่า 40 หรือกรวดที่มีดัชนีความแบนน้อยกว่า 50 จะถือว่าเหมาะที่จะนำไปใช้ทำคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัด 200-350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (British Standards Institution, 1992) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ทั้งกรวดแม่น้ำและหินปูนมีค่าดัชนีความแบนผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งแสดงว่ามีรูปร่างเหมาะสมที่สามารถนำมาเป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตได้

Table 1 Testing result of flakiness index for gravel and limestone

Type of coarse aggregate	Mass of aggregate (g)			Flakiness index
	Retained	Passing	Total	
	A	B	A+B	%
Gravel	19375	5079	22715	22.35%
Limestone	8269	484	8753	5.53%

ดัชนีความแบนบ่งบอกถึงอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของมวลรวม การที่กรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความแบนมากกว่าหินปูนแสดงว่ากรวดแม่น้ำมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่าหินปูน ซึ่งมวลรวมที่มีค่าดัชนีความแบนไม่เกินร้อยละ 25 จะเหมาะในการนำไปเป็นส่วนผสมของคอนกรีตปั๊มและคอนกรีตกำลังสูง (บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, 2553)

Table 2 Testing result of elongation index for gravel and limestone

Type of coarse aggregate	Mass of aggregate (g)			Elongation index
	Retained	Passing	Total	
	C	D	C+D	%
Gravel	7509	16941	22709	33.07%
Limestone	1792	22002	22215	8.07%

จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีความยาว (Elongation index) ของกรวดแม่น้ำและหินปูนใน Table 2 พบว่ากรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความยาวร้อยละ 33.07 หินปูนมีค่าดัชนีความยาวร้อยละ 8.07 ซึ่งกรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความยาวมากกว่ากว่าหินปูนร้อยละ 25.00 (ตามมาตรฐาน BS 882 กล่าวว่า มวลรวมที่มีดัชนีความยาวไม่เกินร้อยละ 35 ถือว่าเหมาะในการนำไปเป็นส่วนผสมคอนกรีต (British Standards Institution, 1992) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ทั้งกรวดแม่น้ำและหินปูนมีค่าดัชนีความยาวผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งแสดงว่ามีรูปร่างเหมาะสมที่สามารถนำมาเป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตได้ ดัชนีความยาวบ่งบอกถึงอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของมวลรวม การที่กรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความยาวมากกว่าหินปูนแสดงว่ากรวดแม่น้ำมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างมากกว่าหินปูน

หากเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างค่าดัชนีความยาวต่อค่าดัชนีความแบน จะพบว่า กรวดแม่น้ำและหินปูนมีอัตราส่วนเป็น 1.48 และ 1.46 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบส่วนใหญ่ที่พบว่าค่าดัชนีความยาวเรียวจะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของดัชนีความแบน (บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, 2553)

ผลการศึกษาความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ

ผลที่ได้จากการศึกษาความต้านทานการสึกกร่อนของกรวดแม่น้ำและหินปูนโดยเครื่องทดสอบลอสแองเจลิสสามารถแสดงได้ดัง Table 3

Table 3 Testing result of abrasion test by Los Angeles machine for gravel and limestone

Type of coarse aggregate	% Loss (Average)
Gravel	26.1
Limestone	24.5

จากผลการทดสอบใน Table 3 พบว่า กรวดแม่น้ำมีค่าร้อยละของการสึกกร่อนร้อยละ 26.1 และหินปูนมีค่าร้อยละของการสึกกร่อนร้อยละ 24.5 ซึ่งกรวดแม่น้ำมีค่าร้อยละของการสึกกร่อนสูงกว่าหินปูนร้อยละ 1.6 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C33 (ASTM C 33, 2003) และ มอก. 566 (สมอ., 2562) ระบุไว้ว่า หินที่ใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องรับแรงเสียดทานมาก เช่น ถนน สนามบิน เมื่อผ่านการทดสอบโดยเครื่องลอสแองเจลิสแล้ว จะต้องมีส่วนสึกกร่อนไปไม่เกินร้อยละ 40 ของน้ำหนักเดิม จึงจะเหมาะสมกับการนำมาผสมทำคอนกรีตสำหรับงานทนการขัดสี และไม่เกินร้อยละ 50 สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กรวดแม่น้ำและหินปูนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความต้านทานการสึกกร่อนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบที่นำมาใช้ในงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า กรวดแม่น้ำที่นำมาใช้ในงานวิจัยมีความเหมาะสมของรูปร่างด้านความหนา ความยาว และความต้านทานการสึกกร่อนน้อยกว่าหินปูนอยู่ร้อยละ 16.82, 25.00 และ 1.6 ตามลำดับ

ผลการศึกษากำลังต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต

ผลการศึกษากำลังต้านทานแรงอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงและหินปูนเป็นส่วนผสมของมวลรวมหยาบ มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเมตร จากการทดสอบตัวอย่างชุดละ 6 ตัวอย่าง แสดงใน Table 4

Table 4 Testing result of compression test for cylindrical concrete specimens

Type of coarse aggregate	Design strength (kg/cm^2)	Average compressive strength (kg/cm^2)	Compressive strength/ Design strength
GV-24	240.0	252.7	1.05
GV-32	320.0	342.3	1.07
LM-24	240.0	272.3	1.13
LM-32	320.0	356.7	1.11

จากผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตตัวอย่าง GV-24 (ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบและมีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และ LM-24 (ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบและมีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งเป็นตัวแทนผลการทดสอบคอนกรีตกำลังปกติที่ใช้สำหรับโครงสร้างทั่วไป พบว่า กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบมีค่าร้อยละ 93 ของคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ ส่วนผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตตัวอย่าง GV-32 (ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบและมีกำลังอัดประลัยออกแบบ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และ LM-32 (ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบและมีกำลังอัดประลัยออกแบบ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งเป็นตัวแทนคอนกรีตที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง พบว่า กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบมีค่าร้อยละ 96 ของคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ

จากผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบพบว่า การใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลหยาบแทนหินปูนทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตลดลงร้อยละ 7 และร้อยละ 4 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ผลการศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต

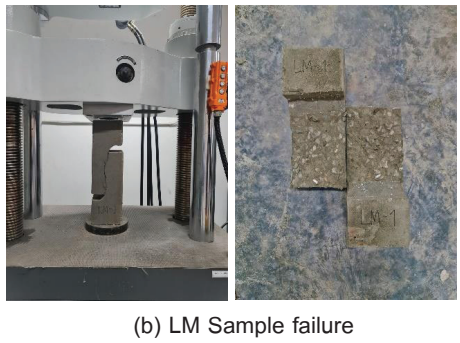
ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่มีกรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นส่วนผสมของมวลรวมหยาบจากตัวอย่างทดสอบ Direct shear test ที่มีพื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน 300 ตารางเซนติเมตร ได้ผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ย จากการทดสอบตัวอย่างชุดละ 5 ตัวอย่าง ดังแสดงใน Table 5

จากผลการศึกษาใน Table 5 พบว่า ค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำผสมเป็นมวลรวมหยาบต่ำกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้หินปูนผสมเป็นมวลรวมหยาบในสัดส่วน 0.73 และ 0.70 เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตอยู่ในช่วง 250-268 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 328-340 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำผสมเป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนมีกำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงประมาณร้อยละ 27 และร้อยละ 30 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปและใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงต้านการเฉือนจากการขัดกันของมวลรวม (Aggregate interlocking) ที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบต่ำกว่ากรณีที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ อันเนื่องมาจากการที่กรวดแม่น้ำมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ทำให้การขัดกันของมวลรวมไม่ดีเท่าหินปูนที่มีผิวค่อนข้างขรุขระ

Table 5 Testing result of direct shear test

Type of coarse aggregate	Average compressive strength (kgf/cm^2)	Average shear strength (kgf)	Shear strength from ACI 318 (kgf)	Average shear strength / Shear strength from ACI 318
GV-24	250.0	7,047.5	2,514.0	2.8
GV-32	328.0	8,468.7	2,879.6	2.9
LM-24	268.0	9,619.1	2,602.9	3.7
LM-32	340.0	11,973.4	2,031.8	5.9

(a) GV Sample failure



(b) LM Sample failure

Figure 2 Failure on shear plane

ลักษณะการวิบัติที่สังเกตุได้จากการทดสอบจะพบว่า เมื่อแรงเฉือนเกิดขึ้นเกินพิกัดที่หน้าตัดรับแรงเฉือนจะรับได้ จะเกิดรอยแตกร้าวขึ้นในบริเวณระนาบวิกฤติสำหรับแรงเฉือนที่ถูกออกแบบไว้สำหรับตัวอย่างทดสอบแต่ละก้อน รอยร้าวจะวิ่งเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องระหว่างขอบบนสุดและขอบล่างสุดของระนาบการร้าวดังแสดงใน Figure 2 การขัดกันของมวลรวมหยาบในเนื้อคอนกรีตและความแกร่งของมวลรวมทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่อยู่ในระนาบของแรงเฉือนวิกฤติทั้งหมด และเมื่อสังเกตุระนาบการร้าวของตัวอย่างทดสอบที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบ (GV) ใน Figure 2(a) จะสังเกตุได้ว่าบนระนาบการแตกร้าวส่วนใหญ่จะเป็นการแตกร้าวที่เนื้อคอนกรีต ไม่พบการแตกร้าวที่กรวดแม่น้ำแต่พบการหลุดร่อนของกรวดแม่น้ำออกจากเนื้อคอนกรีตบางส่วน และเมื่อสังเกตุระนาบการร้าวของตัวอย่างทดสอบที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ (LM) จะพบว่ามีการแตกร้าวของเนื้อคอนกรีตและหินปูนปะปนกัน แสดงให้เห็นว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ลดลงของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบเกิดจากความสามารถในการยึดเกาะกับคอนกรีตของกรวดแม่น้ำไม่ดีพอ อันเนื่องมาจากผิวสัมผัสที่ค่อนข้างเรียบต่างจากคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบที่สามารถยึดเกาะกับเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่า

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่คำนวณโดยสมการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ระบุใน ACI 318 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบกำลังต้านทานแรงเฉือนขององค์อาคารคอนกรีตแบบไม่อัดแรง พบว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนผสมเป็นมวลรวมหยาบมีกำลังต้านทานแรงเฉือนมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการของ ACI 318 ในสัดส่วน 2.8-2.9 เท่า และ 3.7-5.9 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบแม้จะมีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ แต่ยังมีค่าสูงกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 318 นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนตรงของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ระบุในมาตรฐาน ACI 318 มีความปลอดภัยเพียงพอในการต้านทานแรงเฉือนในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

สรุปผล

จากการวิเคราะห์ผลการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงเป็นมวลรวมหยาบ เปรียบเทียบกับผลการศึกษาคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ จะพบว่า

ทั้งกรวดแม่น้ำและหินปูนมีค่าดัชนีความแบนและค่าดัชนีความยาวผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งแสดงว่ามีรูปร่างเหมาะสมที่สามารถนำมาเป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตได้ โดยจากการศึกษาพบว่า กรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความแบนและดัชนีความยาวมากกว่าหินปูนร้อยละ 16.82 และ 25.00 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่ากรวดแม่น้ำมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่าหินปูน และมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างมากกว่าหินปูน ตามลำดับ และหากเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างค่าดัชนีความยาวต่อค่าดัชนีความแบน จะพบว่า กรวดแม่น้ำและหินปูนมีอัตราส่วนเป็น 1.48 และ 1.46 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบส่วนใหญ่ที่พบว่าค่าดัชนีความยาวเรียวจะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของดัชนีความแบน

กรวดแม่น้ำและหินปูนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความต้านทานการสึกกร่อนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบของคอนกรีตที่ใช้สำหรับงานก่อสร้างทั่วไปและคอนกรีตสำหรับงานทนการขัดสี โดยผลการศึกษาพบว่า กรวดที่ใช้ในงานวิจัยมีความต้านทานการสึกกร่อนต่ำกว่าหินปูนร้อยละ 1.6

จากผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบพบว่า การใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลหยาบแทนหินปูนทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตลดลงร้อยละ 7 และร้อยละ 4 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

จากผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบพบว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำผสมเป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงประมาณร้อยละ 27 และร้อยละ 30 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปและใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงต้านการเฉือนจากการขัดกันของมวลรวมที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบต่ำกว่ากรณีที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ อันเนื่องมาจากการที่กรวดแม่น้ำมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ทำให้การขัดกันของมวลรวมไม่ดีเท่าหินปูนที่มีผิวค่อนข้างขรุขระ นอกจากนี้ยังพบว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบมีกำลังต้านทานแรงเฉือนมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการของ ACI 318 ในสัดส่วน 2.8-2.9 เท่า

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ได้อนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมโยธา ในการทดสอบวัสดุในงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

ดำรงค์ หอมดี. (2545). การศึกษาคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้กรวดและหินย่อยเป็นมวลรวมหยาบ. ใน*: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8.* ขอนแก่น.

ดนุพล ตันนโยภาส, ธีรยุทธ ว่องวิริยะสกุล, วัลลภ แซ่ท่อย และชิตพล เอียดปาน. (2551). อิทธิพลของชนิดมวลรวมหยาบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต. ใน: *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6* ; หน้า 68-73.

ธนบดี อินทรเพชร และชูชัย สุจิวรกุล. (2553). การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงเร็วและคอนกรีตกำลังสูงสำหรับใช้งานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน. ใน: *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6*. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. หน้า 427-434.

นเรศ พันธราธร. (2543). *การออกแบบคอนกรีตอัดแรง*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ*:* ไลบรารี่ นาย.

บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (CPAC). (2020). *คู่มือการทดสอบหิน ทราย และคอนกรีต*. บางซื่อ. กรุงเทพฯ.

บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา. (2553). *คุณสมบัติและพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีต*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาคิณ ลอยเจริญ. (2544). *พฤติกรรมรอยต่อแบบเปียกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

รพีพัฒน์ โชควิวัฒนวนิช. (2540). *การใช้กรวดสำหรับคอนกรีตกำลังสูง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. สำนักวิทยบริการ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุมิตร ประทุมวงศ์, ศักดิ์ศรี กลิ่นประเสริฐ และสมคเนย์ ชันชะรุ. (2528). *การสำรวจแหล่งผลิตทรายและกรวด และทดสอบคุณสมบัติในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*. รายงานการวิจัยปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). (2562). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลรวมผสมคอนกรีต มอก.* 566. กลุ่มพัฒนาระบบสารสนเทศ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.).

อัศวิน คุณาแจ่มจรัส. (2549). *การใช้กรวดทดแทนหินในงานคอนกรีตบดอัด*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

American Society for Testing and Materials. (2001). *ASTM C 131. Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine*. West Conshohocken, United States, PA.

American Society for Testing and Materials. (2003). *ASTM C 33. Standard Specification for Concrete Aggregates.* West Conshohocken, United States, PA.

American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM C 192. Standard method of making and curing concretes test specimens in the laboratory.* West Conshohocken, United States, PA.

American Concrete Institute. (2019). *ACI Committee 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.* West Conshohocken, United States, PA.

British Standard Institution. (1989). *Testing aggregates-Part 105: Methods for determination of particle shape-Section 105.1 Flakiness index*. UK: BSI publications.

British Standard Institution. (1990). *Testing aggregates-Part 105: Methods for determination of particle shape-Section 105.2 Elongation index of coarse aggregate*. UK: BSI publications.

British Standards Institution.(1992). *BS 882-Specification for Aggregates from natural sources for concrete*. UK: BSI publications.

Neville, A.M.(1981). *Properties of Concrete.* (3rd Edition).Singapore: Longman Singapore Publishers Pte Ltd.

Weerheijm, J. (2013). *Understanding the tensile properties of concrete*. (First Published). UK: Woodhead Publishing Limited.