

การศึกษาผลของมวลรวมหยาบชนิดต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต
A study on the effect of different types of coarse aggregates on the shrinkage
behavior of concrete

ชำนาญ น้อยพิทักษ์^{1*}, สรรณกร เหมะวิบูลย์², สนธยา ทองอรุณศรี³ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁴
C. Noipitak, S. Hemavibool, S. Tongaroon Sri and S. Tangtermsirikul

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก

⁴ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร

^{1,2} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

³ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna (Tak Campus),

⁴ Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC), School of Civil Engineering and Technology,
Sirindhorn International Institute of Technology (SIIT), Thammasat University

E-mail: nahn_n@hotmail.com, sontaya@rmutl.ac.th, somnuk@siit.tu.ac.th

*Corresponding author E-Mail: saranagonh@nu.ac.th

(Received: August 21, 2018, Revised: November 20, 2018, Accepted: December 7, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของมวลรวมหยาบชนิดต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากภูมิภาคต่าง ๆ ในประเทศไทยจำนวน 4 ชนิด ประกอบด้วย หินบะซอลต์จากภาคตะวันออกเฉียงเหนือ หินแกรนิตจากภาคตะวันออก หินปูนจากภาคกลาง และหินกรวดแม่น้ำจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนบริเวณพื้นที่ติดริมแม่น้ำโขง ปัจจัยที่พิจารณาในการศึกษาประกอบด้วย ความหนาแน่น ร้อยละการดูดซึมน้ำ และโมดูลัสความยืดหยุ่นของหิน จากนั้นทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของมวลรวมหยาบที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตทั้งการหดตัวแบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบโดยรวม ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.55 จากผลการทดสอบพบว่าชนิดของหินที่นำมาผสมคอนกรีตมีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันและมีผลกระทบต่อการพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบอโตจีนัสและแบบโดยรวม ค่าการหดตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามค่าความหนาแน่นของหินและค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ แต่ในทางกลับกันค่าการหดตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของหินมีค่าสูงขึ้น

คำสำคัญ: การหดตัวแบบอโตจีนัส การหดตัวแบบโดยรวม มวลรวมหยาบ

Abstract

This research aims to study the effect of different types of coarse aggregate on the shrinkage behavior of concrete. Four types of coarse aggregate normally used in the construction industry from various regions in Thailand were examined, including basalt from the Northeast, granite from the East, limestone from the Central

region, and river gravel from the Northeast along the Mekong river. The test parameters in this study include density, water absorption, and elastic modulus of coarse aggregate. Then, analyses were carried out on the relationship between these physical properties and the shrinkage of concrete (autogenous and total shrinkage). Ordinary Portland cement (OPC) type I was used in this study as the concrete's binder phase and the water-cement ratios (w/b) of concrete were constant as 0.35 and 0.55. The test results showed that different physical properties were presented in different types of coarse aggregate. As a result, concrete mixtures produced from different types of coarse aggregate have different shrinkage behavior (autogenous and total shrinkage). The shrinkage of hardened concrete tends to increase with an increase of the density and water absorption of coarse aggregate. On the other hand, it is likely to decrease as the modulus of elasticity of rock increase.

Keywords: Autogenous shrinkage, Total shrinkage, coarse aggregate

1. บทนำ

การหดตัวของคอนกรีตเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่มักก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อันส่งผลกระทบต่อความคงทน และสภาวะการใช้งานของโครงสร้าง ดังนั้น เพื่อป้องกันปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากสาเหตุการหดตัวของคอนกรีต นอกเหนือไปจากการควบคุมการก่อสร้างให้ถูกต้องเป็นไปตามหลักวิชาการและได้มาตรฐาน วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องสามารถที่จะประเมินหรือทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีตที่จะเกิดขึ้นเพื่อนำข้อมูลการหดตัวนี้ไปใช้ในการพิจารณาออกแบบหรือเลือกส่วนผสมของคอนกรีตที่มีค่าการหดตัวอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และลดปัญหาการแตกร้าวของโครงสร้าง ด้วยเหตุนี้มาตรฐานการออกแบบต่างๆ จึงได้มีการนำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีต ได้แก่ ACI 209R-92 CEB-FIP-90 Bazant B3 Gardner-Lockman 2001 และ JSCE 2002 เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าการหดตัวที่ได้จากสมการเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ทั้งนี้เป็นเพราะพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการและปัจจัยที่พิจารณาโดยสมการต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ สมการส่วนใหญ่มีได้คำนึงถึงผลของมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวมีเพียงสมการของ ACI 209 เท่านั้นที่มีการคำนึงถึงผลของปริมาณมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยจำนวนมากในอดีตพิจารณาการหดตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นเฉพาะในซีเมนต์เพสต์ในขณะที่มวลรวมนั้นจะพิจารณา

ว่าทำหน้าที่ในการยึดรั้งการหดตัวของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันเริ่มมีงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับผลของมวลรวมที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตและพบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อใช้หินที่มีสมบัติแตกต่างกันในส่วนผสม [1-5] Fujiwara [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสมบัติของมวลรวมที่มีต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่าสมบัติของหินซึ่งประกอบด้วยความหนาแน่น ค่าความชื้น ปริมาตรรูพรุน และค่าการหดตัวมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต Kwan และทีมงาน [3,4] พบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตในอ่างงมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณจากสมการต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณค่าการหดตัวโดยทั่วไปและสาเหตุที่ทำให้ค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าที่สูงกว่านี้อาจเป็นเพราะหินแกรนิตที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตมีค่าการหดตัวค่อนข้างสูง Zhang และทีมงาน [5] ศึกษาเกี่ยวกับผลของมวลรวม (ทราย 14 ชนิด และหิน 3 ชนิด) ที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าและคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่าชนิดและสมบัติของหิน (ได้แก่ ค่าการหดตัว ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ร้อยละการดูดซึ่ม และลักษณะโครงสร้างรูพรุนของหิน) มีผลต่อค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

หินที่ใช้ในงานคอนกรีตในประเทศไทยมีหลายชนิด ประกอบด้วยหินปูน หินบะซอลต์ และหินแกรนิต แหล่งหินเหล่านี้กระจายตัวอยู่แทบทุกจังหวัดภายในประเทศ สมบัติของหินที่ได้จากแต่ละแหล่งมีสมบัติที่แตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของสมบัติของหินเหล่านี้ที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะทำการศึกษาผลของการใช้มวล

รวมทั้งต่างชนิดและมีสมบัติที่แตกต่างกันที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีตให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นต่อไป

2. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 วัสดุประสาน

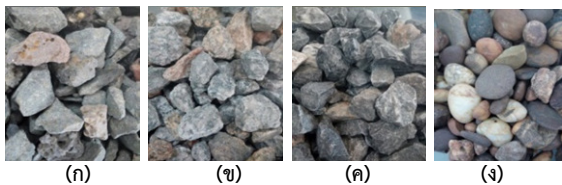
วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ASTM Type I, Ordinary Portland Cement, OPC) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.16 ตามมาตรฐาน ASTM C188

2.2 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำได้มาจากบริเวณลุ่มน้ำปิง จังหวัดกำแพงเพชร เป็นทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร หรือตะแกรงเบอร์ 200 ทรายเหล่านี้มีค่าความถ่วงจำเพาะสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.60 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.65

2.3 มวลรวมหยาบ

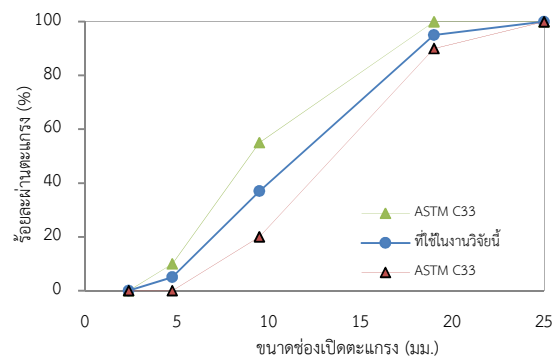
หินที่ใช้ในการผสมคอนกรีตของงานวิจัยนี้มาจากแหล่งต่าง ๆ ภายในประเทศไทยมีจำนวน 4 ชนิด คือ หินบะซอลต์ หินแกรนิต หินปูนและหินกรวดแม่น้ำ แสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชนิดของหิน (ก) หินบะซอลต์ (ข) หินแกรนิต (ค) หินปูน และ (ง) หินกรวด

หินทุกชนิดจะควบคุมให้มีขนาดละเอียดเหมือนกันสำหรับในแต่ละส่วนผสมคอนกรีตและสอดคล้องตามที่แนะนำโดยมาตรฐาน ASTM C33 โดยขนาดละเอียดของหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2 สมบัติทางกายภาพของหินแต่ละชนิดประกอบด้วยค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และโมดูลัสยืดหยุ่นได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ทั้งนี้การหาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำความหนาแน่นอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 127 ค่า

โมดูลัสยืดหยุ่นได้จากการทดสอบแท่งทดสอบหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2 ขนาดละเอียดของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของหินชนิดต่างๆ

ชนิดของหิน	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ ของหิน (%)	โมดูลัสยืดหยุ่นของหิน $\times 10^5$ (กก./ตร.ซม.)
หินบะซอลต์ จ.บุรีรัมย์	2,902	2.35	4.72
หินแกรนิต จ.ตาก	2,819	0.70	2.95
หินปูน จ.สระบุรี	2,758	0.95	5.47
หินกรวดแม่น้ำ	2,741	0.75	3.47
จ.หนองคาย			

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้มีจำนวน 8 ส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.55 เพื่อศึกษาการหดตัวแบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต อัตราส่วนระหว่างทรายต่อมวลรวมทั้งหมด (S/A) เท่ากับ 0.42 มีการควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตและอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างของมวลรวมอัดแน่น (γ) ให้มีค่าเท่ากับ 10 ± 2.5 ซม. และ 1.4 ตามลำดับ ใช้สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 ชนิด Naphthalene Sulphonated based สำหรับการควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วงที่ควบคุม

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตรที่ใช้ในการทดลอง

Mix Proportions	w/b	Type of rock	sp (%)
LR_γ1.4_W/C0.35_S/A0.42	0.35	Limestone	0.80
BR_γ1.4_W/C0.35_S/A0.42	0.35	Basalt	0.80
NR_γ1.4_W/C0.35_S/A0.42	0.35	Granite	0.80
GR_γ1.4_W/C0.35_S/A0.42	0.35	River gravel	0.80
LR_γ1.4_W/C0.55_S/A0.42	0.55	Limestone	0
BR_γ1.4_W/C0.55_S/A0.42	0.55	Basalt	0
NR_γ1.4_W/C0.55_S/A0.42	0.55	Granite	0
GR_γ1.4_W/C0.55_S/A0.42	0.55	River gravel	0

หมายเหตุ sp = สารลดน้ำพิเศษ,

ตารางที่ 3 ผลทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยหินชนิดต่างๆ

รายการ	หินบะซอลต์	หินแกรนิต	หินกรวด	หินปูน
Final setting time (นาท)	218	283	233	248
w/c=0.35				
ค่าหดตัวแบบบอโตจีนัส	360	390	296	275
w/c=0.35				
ค่าหดตัวแบบโดยรวม	781	675	552	463
w/c=0.35				
Final setting time (นาท)	247	313	285	266
w/c=0.55				
ค่าหดตัวแบบบอโตจีนัส	276	255	205	199
w/c=0.55				
ค่าหดตัวแบบโดยรวม	836	757	606	551
w/c=0.55				

หมายเหตุ ค่าการหดตัวของคอนกรีต (หน่วย $\mu\epsilon$) วัดที่ระยะเวลา 250 วัน

3.3 วิธีการทดสอบ

3.2.1 ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีต

ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตเป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดระยะเวลาเริ่มต้นการวัดค่าการหดตัวแบบบอโตจีนัสของแท่งทดสอบคอนกรีต วิธีการทดสอบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C 403 โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการก่อตัวมีขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ใช้จำนวน 2 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย (ผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 3)

3.3.2 การหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีต

การทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยวัดค่าการหดตัวของแท่งคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร ในแต่ละส่วนผสมจะใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย ในงานวิจัยนี้เริ่มวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่าง เมื่อคอนกรีตมีอายุ 2 ชั่วโมง หลังจากระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ทั้งนี้เพื่อให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะถอดออกจากแบบโดยไม่เกิดความเสียหาย การหดตัวแบบบอโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องมีการหุ้มแท่งตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร 2 ชั้นตามด้วยพลาสติกใส 5 ชั้นและเทปกาวใส 2 ชั้น ทำการวัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบว่าน้ำระเหยออกจากตัวอย่างหรือไม่ การสูญเสียน้ำหนักต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.05 ของน้ำหนักเริ่มต้น ตลอดการทดสอบแท่งตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ 28 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 %

3.3.3 การหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต

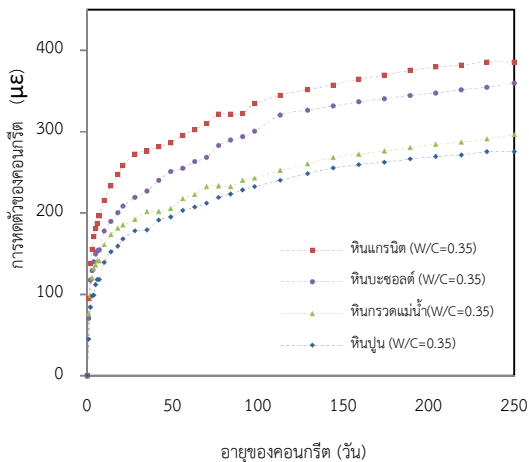
ทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157 ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร ใช้จำนวน 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน แล้วบ่มในน้ำจนมีอายุครบ 7 วัน จากนั้นนำมาเก็บไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ 28 ± 1 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 % วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง ทั้งในช่วงที่บ่มในน้ำและหลังจากขึ้นจากน้ำ ทำการวัดค่าการหดตัวพร้อมชั่งน้ำหนักจนถึงระยะเวลา 250 วัน

4. ผลการวิจัย

4.1 การหดตัวของคอนกรีตแบบบอโตจีนัส

ตารางที่ 3 รูปที่ 3 และ 4 แสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีตที่ใช้หินต่างชนิดกันในแต่ละส่วนผสม จากผลการทดสอบพบว่าค่าการหดตัวของแท่งคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันทั้งกรณี w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 คอนกรีตที่ใช้หินปูนมีค่าการหดตัวที่ต่ำที่สุดสำหรับทั้งสองกรณี แท่งทดสอบที่มีค่าการหดตัวแบบบอโตจีนัสสูงที่สุดสำหรับ

ส่วนผสมคอนกรีตที่มี w/b เท่ากับ 0.35 คือแห่งทดสอบที่ใช้ หินแกรนิต

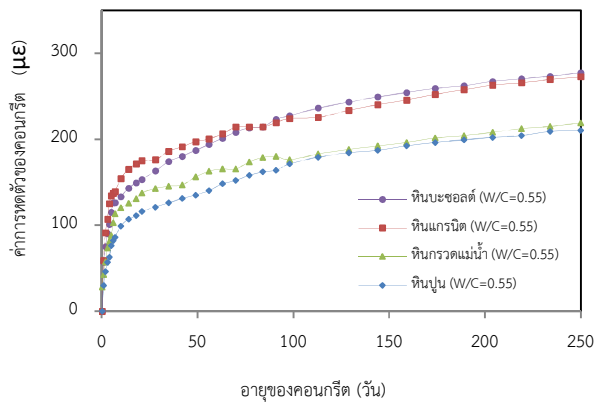


รูปที่ 3 การหาค่าการดูดน้ำของแห่งทดสอบ กรณี w/b = 0.35

สำหรับกรณีส่วนผสมคอนกรีตที่มี w/b เท่ากับ 0.55 ค่าการดูดน้ำของแห่งทดสอบกรณีที่มีหินแกรนิตและกรณีที่มีหินบะซอลต์มีค่าใกล้เคียงกัน (ดังที่แสดงในรูปที่ 4) โดยในช่วงประมาณ 90 วันแรกการดูดน้ำของแห่งทดสอบที่มีหินแกรนิตมีค่ามากกว่าเล็กน้อย แต่หลังจากนั้นแห่งทดสอบที่ใช้หินบะซอลต์เริ่มมีค่าการดูดน้ำที่มากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อลด w/b ลงเท่ากับ 0.35 กลับพบว่าคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นส่วนผสมมีค่าการดูดน้ำต่ำกว่ากรณีที่ใช้หินแกรนิตอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้หากพิจารณาสมบัติของหินในตารางที่ 1 พบว่าหินทั้งสี่ชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน ถ้าพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของหินแต่ละชนิดพบว่าหินบะซอลต์จะมีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีหิน 3 ชนิดที่เหลือ ดังนั้น หนึ่งในปัจจัยที่เป็นสาเหตุทำให้ค่าการที่การดูดน้ำของส่วนผสมที่ใช้หินบะซอลต์มีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้หินแกรนิต กรณีส่วนผสมที่มี w/b เท่ากับ 0.35 น่าจะเกิดขึ้นจากน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในหินบะซอลต์ซึ่งมีปริมาณที่มากกว่าหินอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลองเคลื่อนออกจากหินและซดเขย่นบางส่วนที่สูญเสียไปเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำให้การดูดน้ำของบ่อโตนีลของแห่งตัวอย่างดังกล่าวมีค่าลดลงทำให้มีค่าการดูดน้ำน้อยกว่ากรณีส่วนผสมที่ใช้หินแกรนิต พฤติกรรมดังกล่าวนี้เรียกว่าการบ่มภายใน (Internal curing) หากใช้สมการของ Power [6,7] ในการประเมินปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับการบ่มภายในพบว่าสำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์และมี w/b เท่ากับ

0.35 ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 11.75 กิโลกรัม ต้องการน้ำสำหรับการบ่มภายในเท่ากับ 0.74 กิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่สามารถกักเก็บไว้ในหินบะซอลต์ที่มีปริมาณเท่ากับ 0.67 กิโลกรัม พบว่ามีปริมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในหินบะซอลต์จึงมีปริมาณที่เพียงพอ (เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณตามสมการของ Power) สำหรับการบ่มภายในและมีผลทำให้การดูดน้ำของบ่อโตนีลมีค่าลดลง แต่สำหรับกรณีส่วนผสมที่มี w/b เท่ากับ 0.55 เนื่องจากมีปริมาณน้ำอิสระในช่องว่างคัปิลลารี (Capillary pores) เป็นจำนวนมากและเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [6] โดยไม่จำเป็นต้องใช้การบ่มภายใน ดังนั้น ผลของน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในหินบะซอลต์ที่มีต่อการดูดน้ำของบ่อโตนีลของแห่งทดสอบจึงมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี w/b เท่ากับ 0.35

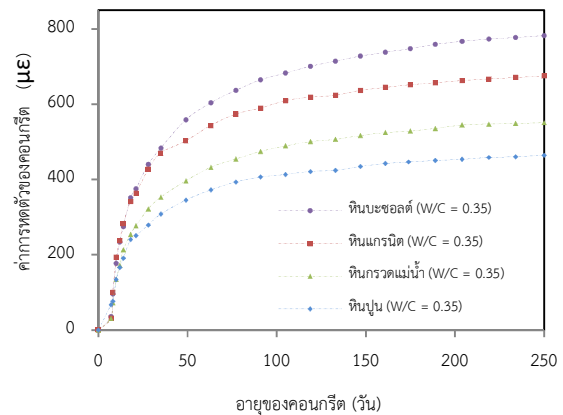
นอกเหนือจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของการบ่มภายในแล้วพฤติกรรมการยึดรั้งการดูดน้ำของซีเมนต์เพสต์ของมวลรวมก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการดูดน้ำของคอนกรีต โดยทั่วไป หินที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะมีความสามารถในการยึดรั้งการดูดน้ำของซีเมนต์เพสต์ได้ดีกว่ากรณีที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า จากผลการทดสอบดังที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าหินทั้ง 4 ชนิดมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแตกต่างกันโดยหากเรียงลำดับชนิดหินที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากไปหาน้อยสามารถเรียงลำดับได้คือ หินปูน หินบะซอลต์ หินกรวดแม่น้ำ และหินแกรนิต ดังนั้น หนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้คอนกรีตที่มีหินปูนมีค่าการดูดน้ำต่ำที่สุดน่าจะเกิดขึ้นจากผลของประสิทธิภาพในการยึดรั้งการดูดน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ดีที่สุดของหินปูนเมื่อเปรียบเทียบกับหินชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการศึกษา และในทางกลับกันคอนกรีตที่มีหินแกรนิตซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุดจึงมีค่าการดูดน้ำสูงที่สุด อย่างไรก็ตามส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าหินกรวดแม่น้ำกลับมีค่าการดูดน้ำสูงกว่าคอนกรีตที่มีผสมกรวดแม่น้ำอย่างชัดเจน ผลดังกล่าวนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยอื่นนอกเหนือไปจากผลของการบ่มภายในและการยึดรั้งการดูดน้ำของซีเมนต์เพสต์จากมวลรวมซึ่งในประเด็นดังกล่าวนี้ควรต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต



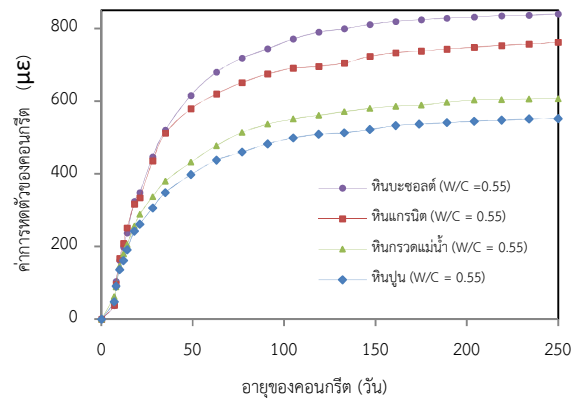
รูปที่ 4 การหดตัวแบบบอโตจีนซิสของแท่งทดสอบ กรณี $w/b = 0.55$

4.2 การหดตัวแบบโดยรวมของคอนกรีต

การหดตัวโดยรวมเป็นผลรวมของค่าการหดตัวแบบบอโตจีนซิสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยปัจจัยที่พิจารณาสำหรับการศึกษานี้คือชนิดของมวลรวมหายาที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตที่มี w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 รูปที่ 5 รูปที่ 6 และตารางที่ 3 แสดงค่าการหดตัวโดยรวมโดยเริ่มแสดงค่าการหดตัวของแท่งทดสอบตั้งแต่ภายหลังจากการนำตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำจนถึงระยะเวลา 250 วัน สำหรับกรณี w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าอัตราการหดตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเริ่มมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ชนิดของมวลรวมหายาที่ใช้มีผลต่อค่าการหดตัวโดยรวมอย่างชัดเจนและผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต โดยค่าการหดตัวเรียงจากค่ามากลงมาหาค่าน้อยที่สุดสำหรับส่วนผสมคอนกรีตทั้งสองกรณี คือ ส่วนผสมที่ใช้ หินปะชอลต์ หินแกรนิต หินกรวดแม่น้ำ และหินปูน ตามลำดับ ค่าการหดตัวโดยรวมที่อายุ 250 วันสำหรับส่วนผสมที่ใช้หินปะชอลต์มีค่าเป็น 1.69 และ 1.52 เท่าของค่าการหดตัวโดยรวมกรณีส่วนผสมที่ใช้หินปูนสำหรับ w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างของสมบัติของหินที่ใช้ในแต่ละส่วนผสมโดยจะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป



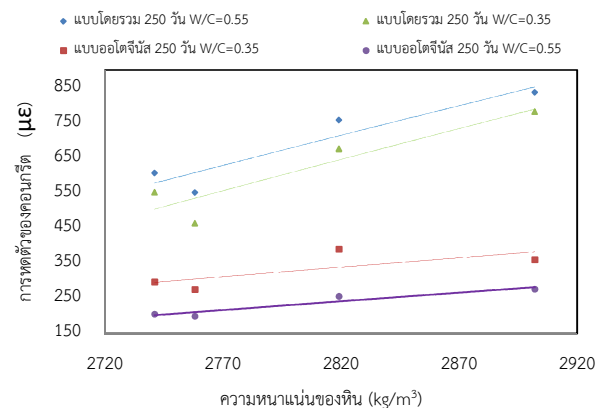
รูปที่ 5 การหดตัวแบบโดยรวมของแท่งทดสอบคอนกรีต กรณี $w/b = 0.35$



รูปที่ 6 การหดตัวแบบโดยรวมของแท่งทดสอบคอนกรีต กรณี $w/b = 0.55$

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของหินต่อการหดตัวของคอนกรีต

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของหินกับค่าการหดตัวของคอนกรีต

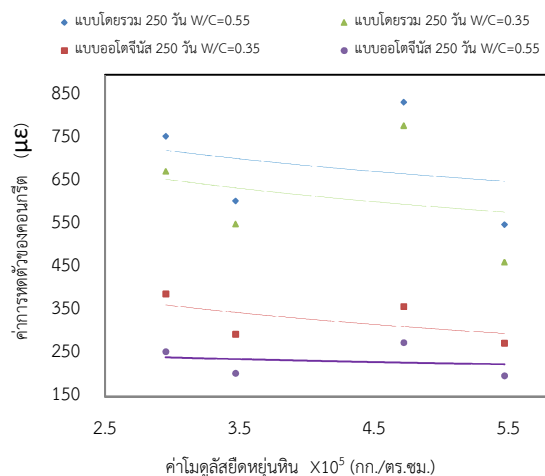


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวของคอนกรีตกับความหนาแน่นของหินชนิดต่างๆ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของหินกับการหดตัวของคอนกรีตแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมของคอนกรีตที่ระยะเวลา 250 วัน จากผลการทดสอบพบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมสำหรับส่วนผสมที่มี w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นของหินที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต ผลการทดลองที่ได้พบว่ามีค่าแตกต่างจากผลการศึกษาในอดีต [2] ซึ่งพบว่าค่าการหดตัวมีค่าลดลงตามค่าความหนาแน่นของหินที่ใช้ มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจาก Imamoto และ Arai [8] พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET specific surface area) ของหินที่ได้จากวิธี BET มีความสัมพันธ์กับการหดตัวของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของหินที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่หินที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ถึงแม้ว่าจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่าแต่อาจมีรูพรุนที่มีขนาดเล็กมากเป็นจำนวนมากซึ่งทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่ากรณีหินที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าจึงทำให้ได้ผลการทดสอบมีแนวโน้มดังที่แสดงในรูปที่ 7

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของหินกับค่าการหดตัวของคอนกรีต

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหินกับค่าการหดตัวของคอนกรีต (แบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวม) ที่ระยะเวลา 250 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าลดลงตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหินที่สูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [5] ผลการทดสอบที่ได้แสดงถึงผลของความสามารถของมวลรวมหยาบในการยึดรั้งการหดตัวของคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของมวลรวมหยาบที่ใช้ในส่วนผสม แต่อย่างไรก็ตามดังที่แสดงในรูปที่ 8 พบว่าข้อมูลมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ดังนั้น โมดูลัสความยืดหยุ่นของหินที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตจึงเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของคอนกรีตต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหิน

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการใช้มวลรวมหยาบ 4 ชนิดที่มีการใช้โดยทั่วไปสำหรับงานคอนกรีตในประเทศไทยที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมของคอนกรีต โดยงานวิจัยได้มุ่งเน้นในการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของหินที่มีต่อการหดตัวของคอนกรีต จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1) การใช้มวลรวมหยาบที่มีสมบัติแตกต่างกันมีผลต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมอย่างชัดเจน
- 2) จากผลการศึกษาพบว่าการใช้มวลรวมหยาบที่มีค่าการดูดซึมน้ำและโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในส่วนผสมคอนกรีตสามารถช่วยลดค่าการหดตัวทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมได้ อย่างไรก็ตามมีข้อยกเว้นสำหรับกรณีคอนกรีตที่ผสมหินบะซอลต์ซึ่งเป็นหินที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าการดูดซึมน้ำสูงแต่กลับมีการหดตัวของบอโตจีนัส (กรณี w/b = 0.55) และแบบโดยรวมสูงที่สุด
- 3) จากผลการทดสอบพบว่าสำหรับทุกส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินปูนมีค่าการหดตัวทั้งแบบบอโตจีนัสและแบบโดยรวมต่ำที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tarun R. N., Rudolph N. K. and Yoon-moon C. (2006). Effect of different types of aggregates on autogenous and drying shrinkage of concrete, in: 1st International Conference on Advanced Construction Materials (147-160). Monterrey, Mexico.
- [2] Fujiwara, T. (2008). Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 6, No. 1, 31-44.
- [3] Kwan A. K. H., Fung W. W. S. and Wong H. H. C. (2010). Reducing drying shrinkage of concrete by treatment of aggregate. Magazine of Concrete Research, 62, No. 6, 435-442.
- [4] Kwan A. K. H., Au F. T. K., Wong H. H. C. and Ng P. L. (2010). Shrinkage of Hong Kong granite aggregate concrete. Magazine of Concrete Research, 62, No. 2, 115-126.
- [5] Zhang W., Zakaria M. and Hama Y. (2013). Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. Construction and Building Materials, 49, 500-510.
- [6] Jensen O. M. and Hansen P. F. (2001). Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background. Cement and Concrete Research, Vol. 31, 647-654.
- [7] Kovler, K. and Jensen, O. M. (2005). Novel techniques for concrete curing – New method for low w/cm mixtures. Concrete International, 39-42.
- [8] Imamoto, K. and Arai, M. (2008). Simplified evaluation of shrinkage aggregate based on BET surface area using water vapor. Journal of Advanced Concrete Technology, 6, No. 1, 69-75.