การศึกษาอิทธิพลของขนาดมวลรวมรีไซเคิลชั้นคุณภาพ M ต่อกำลังคอนกรีต

THE EFFECT OF THE RECYCLED AGGREGATE CLASS M SIZE ON STRENGTH PROPERTIES OF CONCRETE

ผศ.พนารัตน์ แสงปัญญา[1,*], รศ.ดร.อภิชาติ จิรัฐติยางกูร[1] และ อ.บรรพต เจริญพล[1]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
[*]Corresponding author address: k_panarat@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษาเทคโนโลยีการเตรียมคอนกรีตรีไซเคิลภายใต้ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจและทางเทคนิคได้รับความสนใจอย่างจริงจังมากขึ้นในแต่ละประเทศ เนื่องจากผลกระทบและการมีส่วนร่วมต่อการปกป้องสิ่งแวดล้อมอันจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนของสังคมมนุษย์ งานวิจัยนี้ทำการทดสอบโดยควบคุมตัวแปร ใช้มวลรวมหยาบ 3 กลุ่ม คือ มวลรวมหยาบธรรมชาติ (กลุ่ม N) มวลรวมหยาบจากการรีไซเคิลคอนกรีตผลิตในห้องปฏิบัติการ (กลุ่ม RL) และมวลรวมหยาบจากการรีไซเคิลคอนกรีตผลิตนำเข้าจากโรงงานในประเทศญี่ปุ่น (กลุ่ม RP) เพื่อประเมินอิทธิพลของขนาดมวลรวมหยาบรีไซเคิลชั้นคุณภาพ M ตามมาตรฐาน JIS ที่มีผลต่อคุณลักษณะที่เกี่ยวกับความแข็งแรงของคอนกรีต โดยกำหนดขนาด 12.5–4.75 มิลลิเมตร (ขนาด A), 19.0-9.5 มิลลิเมตร (ขนาด B), 37.5-19 มิลลิเมตร (ขนาด C) เตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C192 หลังจากบ่มเป็นเวลา 28 วัน ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกลของคอนกรีตจากมวลรวมรีไซเคิลและขนาดของมวลรวม และได้เสนอแนะเพื่อปรับการออกแบบสัดส่วนส่วนผสม การศึกษานี้ช่วยสนับสนุนข้อมูลในการปรับส่วนผสมเพื่อพัฒนาคุณลักษณะด้านกำลังคอนกรีตสำหรับโรงงานคอนกรีตจากมวลรวมรีไซเคิล โดยพิจารณาจากขนาดมวลรวมรีไซเคิล

คำสำคัญ: *มวลรวมรีไซเคิล, คอนกรีต, รีไซเคิล,โมดูลัสความยืดหยุ่น, กำลังคอนกรีต*

Abstract

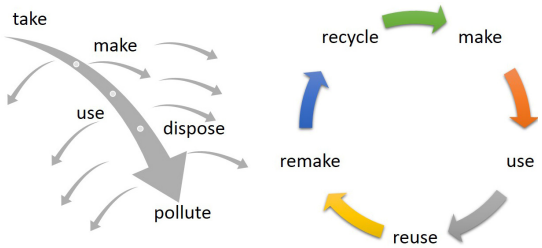
The study of recycled concrete preparation technology under economic and technical feasibility is getting more serious attention in each country due to the impact and contribution to environmental protection which will lead to the sustainable development of human society. This research was conducted by controlling variables test. Three types of aggregates are natural coarse aggregate (N), recycled coarse aggregate prepared in the laboratory using a small crusher (RL) and recycled aggregate prepared by the factory using a large crusher imported from Japan (RP). To assess the influence of aggregates size of recycled coarse aggregates Class M according to JIS on the strength characteristics of concrete with different dimensions, Concrete prepared according to ASTM C192 with recycled aggregates of 12.5–4.75 mm (A), 19.0-9.5 mm (B) and 37.5-19 mm (C) were conducted to a series of unconfined pressure tests after curing for 28 days according to ASTM C39. It was found a relationship between the mechanical characteristics of recycled aggregate concrete and the aggregates particle size. Suggestions to adjust the design of mix proportions from this study. These results would contribute to adjust the remediation mixture for recycling concrete plants by considering the influence of recycled aggregate size.

Keywords: *recycled aggregate, concrete, recycled, modulus of elasticity, strength of Concrete*

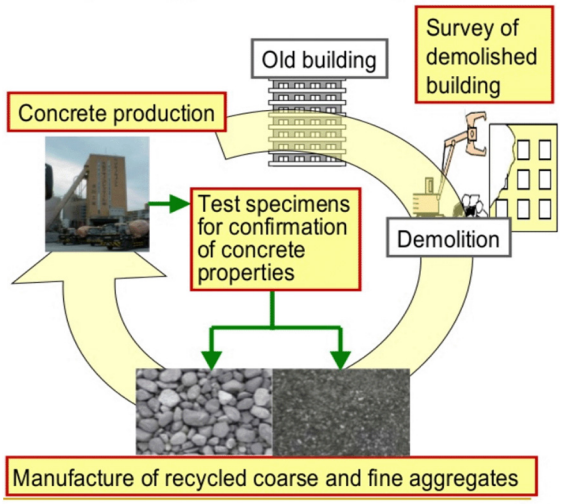
1. บทนำ

งานวิจัยนี้สนับสนุนการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสร้างความสมดุลในการดึงทรัพยากรธรรมชาติมาใช้งานใหม่ โดยมีแนวคิดว่ามวลรวมจากการทุบทำลายอาคารเพื่อพัฒนาพื้นที่ ซึ่งกำลังเกิดขึ้นในปัจจุบันโดยเฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครนั้น ทำให้เกิดขยะที่เป็นเศษคอนกรีตจำนวนมหาศาล จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุสำหรับก่อสร้างอาคารได้อีกครั้งหนึ่ง แนวคิดนี้สนับสนุนระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) [1] เป็นการให้ชีวิตใหม่แก่วัสดุคอนกรีตจากการรื้อถอนอาคาร [2] ดังรูปที่ 1 และ 2 จากข้อมูลของ American Concrete Pavement Association [3] พบว่าโดยปกติทั่วไปสัดส่วนผสมของมวลรวม (Aggregates) จะอยู่ที่ 70% ของปริมาณรวมคอนกรีต ดังนั้น การใช้ทางเลือกอื่นของมวลรวมหยาบมาทดแทนจะสามารถช่วยลดปริมาณมวลรวมธรรมชาติได้ (Natural coarse aggregate, NCA) เป็นที่ทราบว่าการใช้คอนกรีตจากมวลรวมรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate, RCA) ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับการใช้มวลรวมธรรมชาติ [4, 5] อันเป็นผลมาจากค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น และหน่วยน้ำหนักที่ลดลง [6] อย่างไรก็ตามพบว่าคอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นตามอายุของการบ่ม [7] และพบว่า RCA สามารถใช้แทนมวลรวมหยาบธรรมชาติได้ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วน

โครงสร้างหรือไม่ใช่โครงสร้างก็ตาม [8, 9] การวิจัย RCA สำหรับคอนกรีตกำลังอัดสูง (High-strength) และพฤติกรรมที่ดี (High performance) ในโครงสร้างคอนกรีต โดยใช้สารผสมเพิ่ม silica fume และออกแบบสัดส่วนให้มีความเหมาะสม และควบคุมการผสมให้มีความถูกต้องแม่นยำ พบว่ามีความเป็นไปได้ [10]

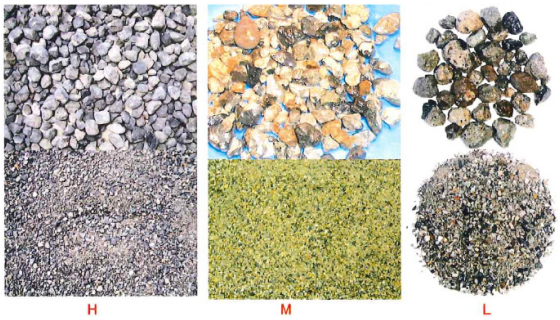


รูปที่ 1 Linear versus circular economy [1]



รูปที่ 2 Circular economy in concrete [2]

ในประเทศไทยได้มีการร่างมาตรฐานมวลรวมในงานคอนกรีตที่ระบุแนวทางในการนำมวลรวมกลับมาใช้ใหม่ โดยแบ่งชั้นคุณภาพออกเป็น 3 ชนิด [11] (ยังไม่ประกาศใช้เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรม) เพื่อควบคุมการใช้ในงานก่อสร้างที่เหมาะสม การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก JICA ภายใต้ความร่วมมือ (MoU) ระหว่างมหาวิทยาลัยรามคำแหงและบริษัทในญี่ปุ่น จึงอ้างอิงคุณสมบัติมวลรวมที่ศึกษาโดยใช้มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งได้จำแนกประเภทของมวลรวมรีไซเคิลสำหรับคอนกรีตไว้ 3 ระดับ เพื่อแบ่งแยกการนำไปใช้ในงานที่เหมาะสม คือ Class H (JIS A 5021), Class M (JIS A 5022) [12] และ Class L (JIS A 5023) โดยมวลรวมรีไซเคิลระดับคุณภาพสูง (Class H) มีลักษณะเหมือนมวลรวมจากหินธรรมชาติและมีคุณสมบัติเทียบเท่ามวลรวมธรรมชาติ มวลรวมรีไซเคิลระดับคุณภาพต่ำ (Class L) ลักษณะเป็นคอนกรีตที่ประกอบด้วยหินขนาดเล็ก และ มอร์ต้าร์ (ทราย + ซีเมนต์เพลต์) ที่ถูกทุบ บด ขัดสี ให้มีขนาดเท่ามวลรวม และ มวลรวมรีไซเคิลระดับคุณภาพปานกลาง (Class M) มีลักษณะระหว่าง Class H และ Class L ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 มวลรวมรีไซเคิลระดับชั้นคุณภาพ H, M และ L [2]

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบโดยควบคุมตัวแปร ใช้มวลรวมหยาบ 3 กลุ่ม คือ มวลรวมหยาบธรรมชาติ มวลรวมหยาบจากการรีไซเคิลคอนกรีตผลิตในห้องปฏิบัติการ และมวลรวมหยาบจากการรีไซเคิลคอนกรีตผลิตนำเข้าจากโรงงานในประเทศญี่ปุ่น เพื่อประเมินอิทธิพลของขนาดมวลรวมหยาบ รีไซเคิลชั้นคุณภาพ M ที่มีผลต่อคุณลักษณะที่เกี่ยวกับความแข็งแรงของคอนกรีต โดยกำหนดขนาด 12.5–4.75 มิลลิเมตร (ขนาด A), 19.0-9.5 มิลลิเมตร (ขนาด B), 37.5-19 มิลลิเมตร (ขนาด C) เตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C192 [13] หลังจากบ่มเป็นเวลา 28 วัน ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [14]

2.1. วัสดุ

วัสดุที่ศึกษาประกอบด้วย น้ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวมละเอียด และ มวลรวมหยาบ โดยใช้น้ำจากโครงการผลิตน้ำดื่มศิลา มหาวิทยาลัยรามคำแหง ส่วนประกอบอื่นมีดังนี้

2.1.1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

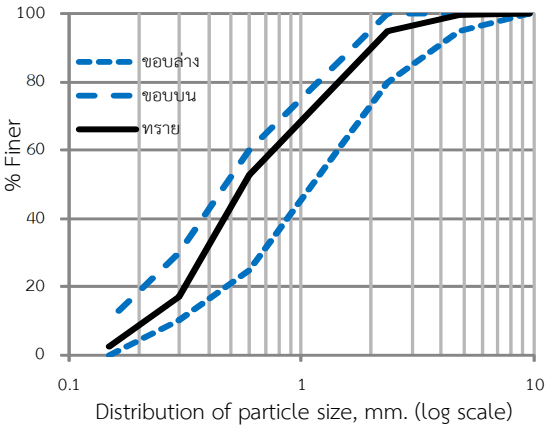
ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Type 1) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ของ SCG

2.1.2. มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

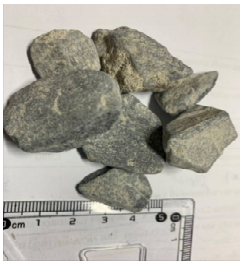
มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่หาซื้อได้ในท้องตลาด มีการกระจายขนาดดังรูปที่ 4 ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย F.M. เท่ากับ 2.837 ความถ่วงจำเพาะมวลรวมละเอียด (อิ่มตัวผิวแห้ง) เท่ากับ 2.65

มวลรวมหยาบที่ศึกษา ประกอบด้วย 3 กลุ่ม ดังรูปที่ 5 คือ มวลรวมหยาบธรรมชาติ (กลุ่ม N) มวลรวมหยาบจากการรีไซเคิลคอนกรีตผลิตในห้องปฏิบัติการ (กลุ่ม RL) และมวลรวมหยาบจากการรีไซเคิลคอนกรีตผลิตจากโรงงานในประเทศญี่ปุ่น (กลุ่ม RP) มวลรวมหยาบรีไซเคิล RL และRP ได้จากการเก็บตัวอย่างจากการ

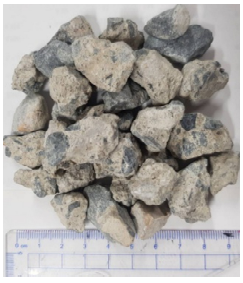
ทุบทำลายอาคารห้างสรรพสินค้าในประเทศไทยที่มีอายุใช้งานประมาณ 35 ปี ในส่วนเสาและคาน ไม่มีปูนฉาบ ขนย้ายคอนกรีตที่ทุบทำลายไปประเทศญี่ปุ่นโดยทางเรือ ผ่านกระบวนการรีไซเคิลคอนกรีต ที่โรงงานทางตอนใต้ของประเทศญี่ปุ่น จากนั้นขนส่งกลับมาประเทศไทยเพื่อนำมาศึกษา โดยมวลรวม RL เป็นมวลก้อนคอนกรีตขนาดใหญ่ประมาณ 25 cm นำกลับมาบด โดยใช้เครื่องบดขนาดเล็กแล้วคัดแยกคุณภาพ Class M โดยใช้เครื่อง JIG Test Machine ที่ให้ยืมจาก SAEZONE., Inc. Japan ในห้องปฏิบัติการผลิตมวลรวมรีไซเคิลขนาดเล็ก ที่มหาวิทยาลัยรามคำแหง ส่วนมวลรวม RP ได้จากกระบวนการผลิตมวลรวมหยาบ Class M ที่โรงงานทางตอนใต้ของประเทศญี่ปุ่นทุกขั้นตอน



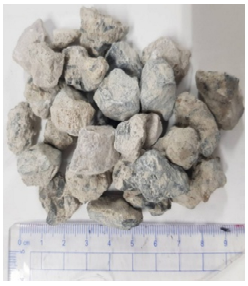
รูปที่ 4 การกระจายขนาดของมวลรวมละเอียดที่ศึกษา



ก) มวลรวมหยาบธรรมชาติ(กลุ่ม N)



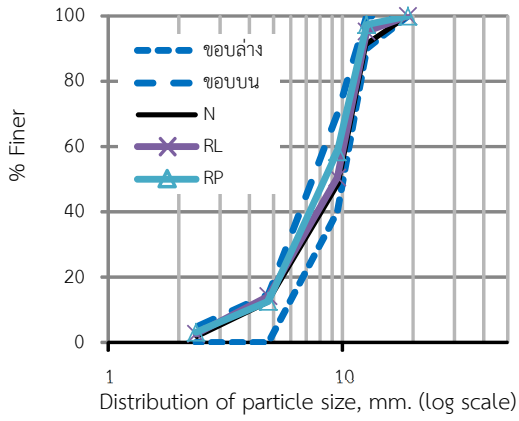
ข) มวลรวมหยาบจากการรีไซเคิลคอนกรีตผลิตในห้องปฏิบัติการ(กลุ่ม RL)



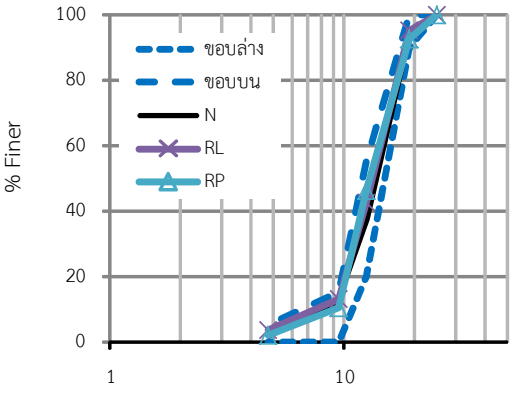
ค) มวลรวมหยาบจากการรีไซเคิลคอนกรีตผลิตนำเข้าจากโรงงานในประเทศญี่ปุ่น (กลุ่ม RP)

รูปที่ 5 มวลรวมหยาบที่ศึกษา

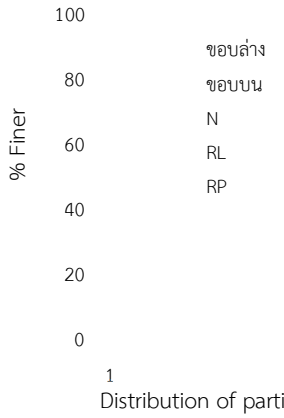
มวลรวมหยาบถูกแยกขนาดโดยร่อนผ่านตะแกรง การกระจายขนาดของมวลรวมหยาบที่ศึกษาแสดงในรูปที่ 6 มี 3 ขนาด คือ ขนาด A (4.75 – 12.5 มิลลิเมตร) ขนาด B (9.5-19.0 มิลลิเมตร) และขนาด C (19.0-37.5 มิลลิเมตร) ซึ่งขนาดคละของมวลรวมหยาบอยู่ในช่วงที่ยอมให้ตามมาตรฐาน ASTM C33



ก) ขนาด A (4.75 – 12.5 มิลลิเมตร)



ข) ขนาด B (9.5-19.0 มิลลิเมตร)



ค) ขนาด C (19-37.5 มิลลิเมตร)

รูปที่ 6 การกระจายขนาดของมวลรวมหยาบที่ศึกษา

คุณสมบัติทายกายภาพของมวลรวมหยาบ Class M มาตรฐาน JIS 5022 กำหนดค่า Density in oven-dry condition ไม่น้อยกว่า 2.3 g/cm^3 ค่า Water absorption ไม่เกิน 5% และปริมาณเม็ดละเอียดกว่า 75 μm ไม่เกิน 2% คุณสมบัติทายกายภาพของมวลรวมหยาบที่ศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่า Bulk Density (compacted), kg/m^3

Particle size, mm	N	RL	RP
12.5–4.75 (A)	1618	1369	1357
19.0-9.5 (B)	1632	1383	1366
37.5-19 (C)	1637	1392	1378

ตารางที่ 2 ค่า Water absorption, %

Particle size, mm	N	RL	RP
12.5–4.75 (A)	1.168	4.761	5.119
19.0-9.5 (B)	0.933	3.910	5.032
37.5-19 (C)	0.726	3.518	4.774

2.2. ส่วนผสมคอนกรีตและการเตรียมตัวอย่าง

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยน้ำหนักจากคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมแต่ละกลุ่มที่ได้จากห้องปฏิบัติการ อ้างอิงมาตรฐาน ACI โดยใช้ค่ากำลังอัดที่ต้องการ f'_c เท่ากับ 280 kg/cm^2 (ksc) ค่าร้อยละของกำลังอัดที่ต่ำกว่าเท่ากับ 5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน s เท่ากับ 10 kg/cm^2 ค่าแฟกเตอร์ความน่าจะเป็น k จะเท่ากับ 1.645 ได้ค่า กำลังอัดเป้าหมาย $f_{cr} = f'_c + ks$ เท่ากับ 296 kg/cm^2 ใช้ค่าการยุบตัว 8 cm ใช้ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม A เท่ากับ 12.5 mm มวลรวม B เท่ากับ 19 mm มวลรวม C เท่ากับ 37.5 mm เลือกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย F.M. เท่ากับ 2.837 ความถ่วงจำเพาะมวลรวมละเอียด (อิ่มตัวผิวแห้ง) 2.65 ความถ่วงจำเพาะมวลรวมหยาบ (อิ่มตัวผิวแห้ง) 2.65-2.7 ความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ เท่ากับ 3.15 ค่าการดูดซึมของมวลรวมละเอียด A_s เท่ากับ 1.158% ความชื้นในมวลรวมละเอียด M_s เท่ากับ 3.51% ความชื้นในมวลรวมหยาบ M_s ของ N, RL, RP เท่ากับ 1.257, 4.584 และ 4.561% ตามลำดับ ส่วนผสมเพื่อเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ศึกษา สำหรับคอนกรีต 1 m^3 แสดงในตารางที่ 3 ถึง ตารางที่ 5

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับมวลหยาบ A (kg) ต่อ 1 m^3

วัสดุ	NA	RLA	RPA
ปูนซีเมนต์	391	391	391
น้ำ	193	192	194
ทราย	834	993	1001
มวลรวมหยาบ	921	779	772
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2339	2355	2329

มวลรวมหยาบรีไซเคิล Class M ที่ใช้ศึกษานี้ เมื่อเทียบกับชนิดของมวลรวมหยาบในร่างมาตรฐานมวลรวมของประเทศไทย จะอยู่ในกลุ่ม มวลรวมหยาบชั้นคุณภาพที่ 2 กำลังอัดที่ยอมให้สูงสุด 50 MPa (510 ksc) แนวทางการใช้ในงานคอนกรีต เป็นงานคอนกรีตทั่วไป แต่ไม่แนะนำให้ใช้กับคอนกรีตที่ ต้องเผชิญกับสภาพ แวดล้อมที่มีคลอไรด์และซัลเฟตสูง

ตารางที่ 4 ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับมวลหยาบ B (kg) ต่อ 1 m^3

วัสดุ	NB	RLB	RPB
ปูนซีเมนต์	364	364	364
น้ำ	173	172	182
ทราย	776	951	962
มวลรวมหยาบ	1048	887	877
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2361	2374	2385

ตารางที่ 5 ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับมวลหยาบ C (kg) ต่อ 1 m^3

วัสดุ	NB	RLB	RPB
ปูนซีเมนต์	318	318	318
น้ำ	142	145	157
ทราย	735	922	937
มวลรวมหยาบ	1203	1023	1012
รวมน้ำหนักทั้งหมด	2398	2408	2424

ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ถูกเตรียมโดยแบบหล่อและวิธีการตามมาตรฐาน ASTM C 39 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm หลังจากคอนกรีตเซตตัวในแบบหล่อ 24 ชั่วโมง ถอดแบบออกแล้วบ่มในน้ำ 28 วัน จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่างต่อกรณีศึกษา รวม 45 ตัวอย่าง

2.3. การคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตข้างต้นถูกนำไปทดสอบหากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ UTM ในห้องปฏิบัติการคอนกรีต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง แล้วบันทึกค่าความเค้น-ความเครียด และกำลังอัดประลัย ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตคำนวณโดย ในแต่ละ 1 กรณีศึกษา ซึ่งมี 5 ตัวอย่าง ได้ผลค่ากำลังอัดประลัย 5 ค่า จะตัด ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดออก แล้วนำค่ากำลังที่เหลือ 3 ค่า ตรงกลาง มาใช้หาค่าเฉลี่ย

3. ผลการวิจัย

3.1. ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมที่ศึกษา

ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) คือตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความละเอียดของมวลรวมนั้น ๆ สามารถหาได้จากผลรวมของค่าเปอร์เซ็นต์ค้างสะสมของแต่ละตะแกรง (ในการศึกษานี้ใช้ ขนาด 1” ¾” ½” 3/8” #4 #8 #16 # 30 #50 #100) หารด้วยร้อย (ถ้าไม่ได้ทำการทดสอบตะแกรงใด ให้ใช้ค่าค้างสะสมตะแกรงด้านบน) โดยทั่วไปมวลรวมละเอียดที่ใช้ผสมคอนกรีต ควรมีค่าโมดูลัสของความละเอียดอยู่ระหว่าง 2.30.3.20 [15] ค่าโมดูลัสความละเอียดเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย เป็นตัวบ่งบอกว่าลักษณะมวลรวมนั้นหยาบหรือละเอียด ค่าโมดูลัสความละเอียดไม่สามารถใช้บอกขนาดคละของมวลรวมได้ แต่สามารถใช้ควบคุมความสม่ำเสมอของมวลรวมที่ผลิตจากแหล่งเดียวกัน นอกจากนี้ค่าโมดูลัสความละเอียดยังบอกถึงขนาดโดยส่วนใหญ่ของมวลรวมว่าค้างอยู่บนตะแกรงลำดับที่เท่าใดโดยเริ่มนับจากตะแกรงเบอร์ 100 ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมที่ศึกษาแสดงในตารางที่ 6 กลุ่ม A คือ NA RLA และ RPA มีค่า 6.14-6.38 กลุ่ม B คือ NB RLB และ RPB มีค่า 7.28-7.48 กลุ่ม C คือ NAC RLC และ RPC มีค่า 9.09-9.36

ตารางที่ 6 ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ของมวลรวมที่ศึกษา

Particle size, mm	N	RL	RP
12.5–4.75 (A)	6.38	6.27	6.14
19.0-9.5 (B)	7.48	7.28	7.38
37.5-19 (C)	9.36	9.24	9.09

3.2. COMPRESSIVE STRENGTH

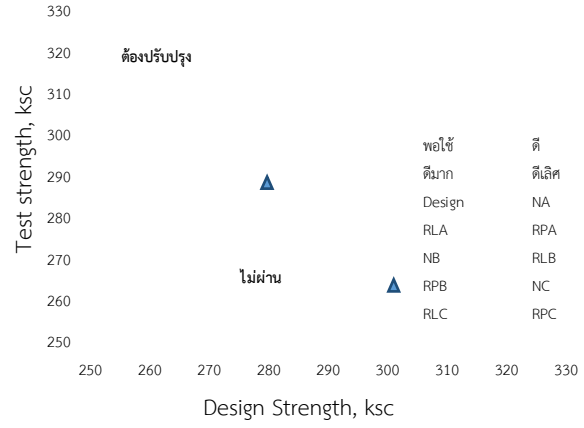
ตารางที่ 7 แสดงถึงกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ศึกษา พบว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหินให้ผลกำลังรับแรงอัดค่าสูงกว่าที่ออกแบบไว้ (280 ksc) คือ 108 – 115 % ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลหยาบรีไซเคิลให้ผลกำลังรับแรงอัด 101 – 104 % ของค่ากำลังออกแบบ แต่มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหิน 5.2-10.2 % โดยที่ตัวอย่างที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก มีกำลังต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหิน และน้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ โดยตัวอย่างกลุ่ม A ขนาด 4.75 – 12.5 mm ให้ผลกำลังต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้มวลหินเท่ากับ 5.2-5.9 % ตัวอย่างกลุ่ม B ขนาด 9.5-19.0 mm ให้ผลกำลังต่ำกว่า 9.4-9.9 % และ ตัวอย่างกลุ่ม C ขนาด 19.0-37.5 mm ให้ผลกำลังต่ำกว่า 9.5-10.2 % เมื่อพิจารณากำลังที่ออกแบบกับกำลังที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างในรูปที่ 8 จะเห็นว่าผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ผลิตในห้องปฏิบัติการ (RL) และที่ผลิตในโรงงาน (RP) มีกำลังอัดประลัยสูงกว่าที่ออกแบบไว้เล็กน้อย เมื่อตรวจสอบกับเกณฑ์การประเมินการควบคุมการผลิต โดยเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่ออกแบบ พบว่าอยู่ในช่วงดีเลิศ แต่ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ

กราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ขึ้นมีกำลังสูงขึ้น แต่ใช้ซีเมนต์ลดลง (ตารางที่ 3-5) คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิล ที่ผลิตในห้องปฏิบัติการ และที่ผลิตในโรงงาน มีกำลังอัดประลัยใกล้เคียงกัน

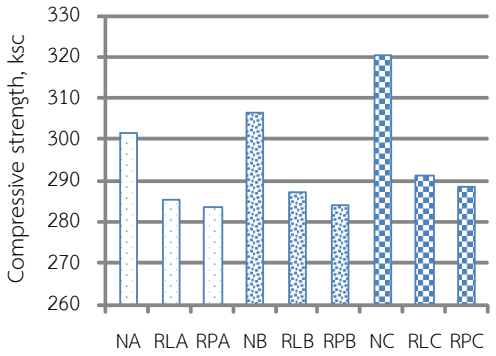
ค่าโมดูลัสความละเอียดที่สูงกว่าบ่งบอกถึงขนาดของมวลรวมที่ใหญ่กว่า กำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับการคละขนาดและขนาดของมวลรวมเช่นกัน โดยทั่วไปกำลังอัดคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสความละเอียดและขนาดของมวลรวม เมื่อขนาดของมวลรวมเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวของมวลจะลดลง ทำให้ปริมาณของวัสดุประสานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวและส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 10 สามารถกล่าวได้ว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตาม ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 7 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ศึกษา

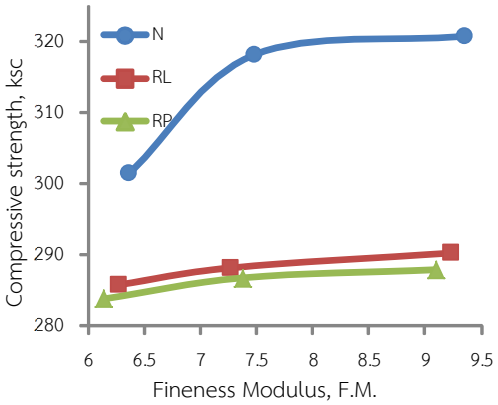
Aggregate	Strength, ksc	% strength	Strength drop, %
NA	302	108	
RLA	286	102	5.2%
RPA	284	101	5.9%
NB	318	114	
RLB	288	103	9.4%
RPB	287	102	9.9%
NC	321	115	
RLC	290	104	9.5%
RPC	288	103	10.2%



รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ศึกษา (kg/cm^2)

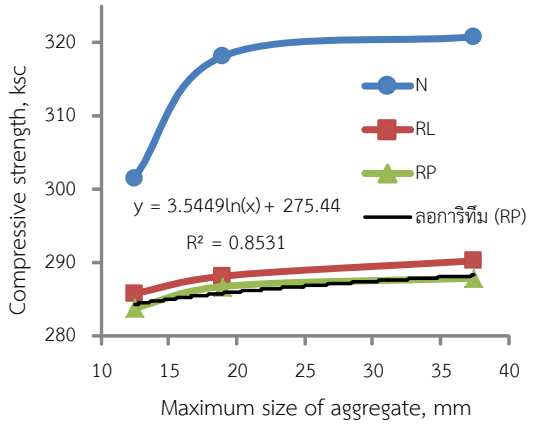


รูปที่ 9 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ศึกษา (kg/cm^2)



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดกับค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบที่ใช้ในกรณีศึกษา

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้พิจารณาจาก เปอร์เซ็นต์ที่ค้างว่าตะแกรงร่อนใหญ่ (หยาบ) ที่สุด อันใดมีเปอร์เซ็นต์ของมวลรวมที่ค้างมากกว่าหรือเท่ากับ 15% ให้นับขนาดตะแกรงอันที่ใหญ่กว่านั้นขึ้นไปอีก 1 ชั้น เป็นขนาดใหญ่สุดของมวลรวมนั้น รูปที่ 11 พบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่ต้องการลดลงจากพื้นที่ผิวยึดเหนี่ยวกับมวลรวมน้อยลงและความไม่ต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีตลดลง จากการที่อนุภาคมวลรวมใหญ่ขึ้น [16] และจากรูปที่ 11 เห็นว่ากำลังอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดเพิ่มจาก 12.5 mm เป็น 19 mm จากนั้นขนาดที่เพิ่มขึ้นอีก 19 mm เป็น 37.5 mm ส่งผลต่อการเพิ่มกำลังอัดเล็กน้อย ความสัมพันธ์ของกำลังอัดและขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ผลิตจากโรงงาน (RP) สามารถเขียนในรูปลอกการิทึม โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.8531 ได้ดังนี้



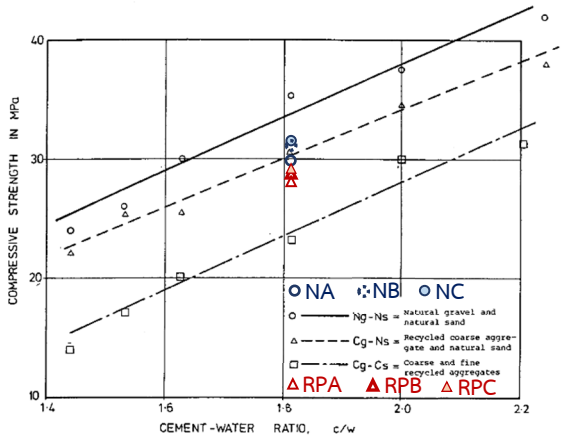
รูปที่ 11 อิทธิพลของขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$$y = 0.0127ln(x) + 0.9837 \quad (1)$$

โดย y คือ ค่า Compressive strength ในหน่วย ksc
x คือ ค่า Maximum size of aggregate ในหน่วย mm

ชุดของการวิจัยของ Mukai et al. [17] ซึ่งระบุไว้ใน Cement Association of Japan พบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนของซีเมนต์ต่อน้ำ (c/w) กับกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงด้วยเช่นกัน ของคอนกรีตที่ทำจากมวลรวม 3 กลุ่ม คือ มวลรวมหยาบและละเอียดธรรมชาติ (Ng-Ns) มวลรวมหยาบรีไซเคิลและมวลละเอียดธรรมชาติ (Cg-Ns) และมวลหยาบและละเอียดรีไซเคิล (Cg-Cs) ในรูปที่ 12 ซึ่งสรุปได้ว่า อัตราส่วนของซีเมนต์ต่อน้ำเป็นค่าพื้นฐานของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมดสามารถนำไปใช้ออกแบบส่วนผสมได้โดยไม่ต้องปรับปรุงใดๆกับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจากมวลรวมรีไซเคิล เพียงแค่ระดับของกำลังรับแรงอัดที่ได้จะต่ำกว่าของคอนกรีตจากมวลรวมธรรมชาติ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากรูป จะเห็นได้จากเส้นตรงทั้งสามเกือบขนานกันแต่ลดระดับค่ากำลังรับแรงอัดลงมา สำหรับ Cg-Ns พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลง 13-14% ส่วน Cg-Cs ลดลง 30-40% เมื่อเทียบกับการศึกษานี้ จะสอดคล้องกับกรณี Ng-Ns และ Cg-Ns ซึ่งใช้ค่า c/w เท่ากับ 1.82 ในการออกแบบส่วนผสม พบว่า กำลังรับแรงอัดลดลง 5.2-10.2% (รูปที่ 12 และตารางที่ 7) จากการศึกษานี้จึงได้คำแนะนำในการพัฒนาสัดส่วนจากการใช้มวลรวมรีไซเคิล คือ ในการออกแบบ ควรจะสมมติให้ใช้ w/c สำหรับกำลังอัดที่ต้องการ จะ

ทำให้ได้คอนกรีตจากมวลรวมรีไซเคิลเทียบเท่ากับคอนกรีตทั่วไปก่อน ในกรณีที่ผลกำลังอัดที่ได้ต่ำกว่าที่สมมติไว้ ให้ทำการปรับค่า w/c ลดลง



รูปที่ 12 อัตราส่วนซีเมนต์ต่อน้ำกับกำลังรับแรงอัดคอนกรีตจากมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิล

4. สรุปผลการวิจัย

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหินให้ผลกำลังรับแรงอัดค่าสูงกว่าที่ออกแบบไว้ (280 ksc) 108 – 115 % คอนกรีตที่ใช้มวลหยาบรีไซเคิลให้ผลกำลังรับแรงอัด 101 – 104 % ของค่ากำลังออกแบบ แต่มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหิน 5.2-10.2 % ตัวอย่างที่ใช้มวลรวมขนาดเล็ก มีกำลังต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้มวลหิน และน้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ผลิตในห้องปฏิบัติการ และที่ผลิตในโรงงาน มีกำลังอัดประลัยสูงกว่าที่ออกแบบไว้เล็กน้อย ๆ เทียบกับเกณฑ์การประเมินการควบคุมการผลิตแล้วพบว่าค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงดีเลิศ แต่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ขึ้นมีกำลังสูงขึ้น แต่ใช้ซีเมนต์ลดลง คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลที่ผลิตในห้องปฏิบัติการและที่ผลิตในโรงงาน มีกำลังอัดประลัยใกล้เคียงกัน

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ เนื่องจากปริมาณของวัสดุประสานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวและส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

กำลังอัดคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดเพิ่มจาก 12.5 mm เป็น 19 mm จากนั้นขนาดที่เพิ่มขึ้นอีก 19 mm เป็น 37.5 mm ส่งผลต่อการเพิ่มกำลังอัดเล็กน้อย

คำแนะนำในการพัฒนาสัดส่วนจากการใช้มวลรวมรีไซเคิล คือ ในการออกแบบ ควรจะสมมติให้ใช้ w/c สำหรับกำลังอัดที่ต้องการจะทำให้ได้คอนกรีตจากมวลรวมรีไซเคิลเทียบเท่ากับคอนกรีตทั่วไปก่อน ในกรณีที่ผลกำลังอัดที่ได้ต่ำกว่าที่สมมติไว้ ให้ทำการปรับค่า w/c ลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทเซโซน แห่งประเทศญี่ปุ่น และ JICA ที่สนับสนุนเครื่องจักรในการคัดแยกคุณภาพของมวลรวมจากการทุบทำลายอาคาร ขอบพระคุณ ผศ.วุฒิศักดิ์ ลาภเจริญทรัพย์ และอธิการบดี มหาวิทยาลัยรามคำแหง รวมถึง รศ.ดร.มณี อัชวรานนท์ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา ผศ.พรชัย วงศ์วาสนา และ ผศ. พิศิษฐ์ แสง-ชูโต ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยเกี่ยวกับการใช้มวลรวมรีไซเคิลของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ตั้งแต่แรกเริ่มและตลอดมา

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Catherine Weetman, (2016). A Circular Economy Handbook for Business and Supply Chains: Repair, Remake, Redesign, Rethink, Koganpage publisher, 432 pages.

[2] Shima, H.,Tateyashiki, H.,Matsuhashi R.,and Yoshida, Y.,An. (2005). Advanced Concrete Recycling Technology and Its Applicability Assessment through Input-output Analysis, Journal of Advanced Concrete Technology,3(1), , pp.53-67.

[3] ACPA. (2009). Properties of concrete containing RCA [online], [cited 2 May 2011]. Available from Internet: http://www.pavement.com/Downloads/TS/EB043P/TS043. 5P.pdf.

[4] เทอดศักดิ์ สายสุทธิ์. (2559). RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต RCA การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9. p125 -134.

[5] Kang, M. and Weibin, L., (2018). Effect of the Aggregate Size on Strength Properties of Recycled Aggregate Concrete, Advances in Materials Science and Engineering Journal, Volume 2018, Article ID 2428576, 8 pages.

[6] Nixon, P.J., (1997). Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review. First state-of-the-art report RILEM TC-37-DRC. Materials and Structures (RILEM), no. 65, p. 371–378.

[7] Olorunsogo, F.T. and Padayachee, N., (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitoring by durability indexes, Cement and Concrete Research 32(2), p179-185.

[8] Hendriks, C.F., Pieterson, H.S. (1998). Sustainable raw materials–construction and demolition waste. RILEM Report 22, France: RILEM Publication Series.

[9] Tu, T.-Y.; Chen, Y.-Y.; Hwang, C.-L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates, Cement and Concrete Research 36(5): p943–950.

[10] Shayan, A.; Xu, A. (2003). Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate, ACI Materials Journal 100(5): p371–380.

[11] Nitichok, K. and Yodsudjai, W. (2017). Development of sustainable concrete by using of recycled aggregate in concrete, Journal of Thailand Concrete Association, Vol. 5, No. 2, pp. 36-48. (in Thai)

[12] Japanese Industrial Standard. (2018). JIS A 5022:2018 Recycled aggregate concrete-Class M.

[13] ASTM C192/C192M-02, (2003). "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02; pp. 126-133.

[14] ASTM C39. (2016) "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", Annual book of ASTM Standards.

[15] CPAC (2000). Concrete Technology. The Concrete Product and Aggregate co., ltd. Bangkok, Thailand 25-44, 206p. https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0063.

[16] A.M. Neville (2005). Properties of Concrete, Fourth Edition, ISBN 13: 9788177585872, Pearson Education, New Delhi, India.

Mukai T., Kikuchi M., Ishikawa. (1978). Study on the properties of concrete containing recycled concrete aggregate, Cement Association of Japan, 32nd review, 1978 (in english).