

## การใช้คอนกรีตที่ทดสอบกำลังอัดแล้วเพื่อเป็นมวลรวมของคอนกรีต

## Utilization of Tested Concrete as Aggregates in Concrete

ศุภศักดิ์ ภูสันติพงษ์ รักษ์ บูรณสิงห์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

Surasak Phusantiphong Rak Buranasing and Chai Jaturapitakkul

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

โทร.02 4709137 โทรสาร 02 4279063 E-mail : chai.jat@kmutt.ac.th

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อนำมวลรวมที่ได้จากการย่อยคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบกำลังอัด โดยมีช่วงกำลังอัดระหว่าง 180-250, 250-400 และ 400-550 กก/ซม<sup>2</sup> มาใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบของคอนกรีต ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตสดที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต มีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วขึ้นกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ช่วยเพิ่มความสามารถในการเทและยี่ระยะเวลาการสูญเสียค่าการยุบตัวออกไป ด้านกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง โดยทุกอายุทดสอบมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 85 ของคอนกรีตควบคุม สำหรับการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง โดยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 11 ถึง 22 ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่อายุต้น แต่สามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตพบว่ามีความต่ำกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ทำนายโดยมาตรฐาน ว.ศ.ท. 1008 [1] ระหว่างร้อยละ 8 ถึง 27

## Abstract

This research is the utilization of tested concrete as aggregates in concrete. The compressive strengths of tested concrete between 180-250, 250-400, and 400-550 ksc were selected and crushed as fine and coarse aggregates. The results indicate that the slump loss of fresh concrete with recycled aggregate is faster than the control concrete. Use of fly ash 20% by weight to replace cement can increase workability and retard the slump loss of fresh concrete. The higher strength of tested concrete as coarse recycled aggregate produces higher compressive strength than that of the lower one. The compressive strengths of concrete with coarse recycled aggregate are higher than 85% of the control concrete. The high replacement of fine recycled aggregate in concrete results in the lower compressive strength between 11 to 22% as compared

to the control concrete. Moreover, concrete with 20% replacement of fly ash gives low compressive strength at early age, however, it can develop the compressive strength to be high at the later age. The modulus of elasticity of recycled aggregate concrete is lower than the value predicted by E.I.T. Standard 1008 [1] between 8 to 27%.

## 1. บทนำ

การรีดลอนหรือทำลายสิ่งปลูกสร้างเดิมเพื่อสร้างสิ่งปลูกสร้างใหม่ เศษคอนกรีตที่เหลือจากการรีดลอนสิ่งปลูกสร้างดังกล่าว หากไม่มีการกำจัดหรือจัดเก็บที่ดีย่อมส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและทัศนียภาพในบริเวณนั้นๆ นอกจากนี้ยังมีเศษคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดที่ได้จากการเก็บตัวอย่างทดสอบจากสถานที่ก่อสร้าง ซึ่งมีปริมาณมากและมีการทดสอบทุกวัน เศษคอนกรีตเหล่านี้แม้ว่าบางส่วนสามารถนำไปใช้ในงานถมหรือชั้นรองพื้นทางในงานถนน แต่ยังคงมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่มีอยู่ทั้งหมด ขณะที่ส่วนใหญ่ต้องกำจัดทิ้ง แต่เนื่องจากการขนส่งที่มีขีดจำกัดทั้งในด้านขนาดและปริมาณ อีกทั้งระยะทางในการขนส่งไปยังสถานที่กำจัดทิ้ง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการกำจัดเศษคอนกรีตสูงขึ้น

Katz [2] ได้นำเศษคอนกรีตที่ผ่านการทำลายมาย่อยแล้วใช้ทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติในงานคอนกรีต พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติเป็นส่วนผสมร้อยละ 25 ขณะที่ Tavakoli และ Soroushian [3] พบว่ามวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจากสถานที่รีดลอนจริงสามารถใช้เป็นวัสดุที่มีคุณภาพสูงในการทำคอนกรีตได้ นอกจากนั้น Malhotra [4] ศึกษาการพัฒนาการกำลังของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตทดแทนมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวล้วนเป็นงานวิจัยที่ศึกษาการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในต่างประเทศ ซึ่งมวลรวมอาจมีคุณภาพแตกต่างกับมวลรวมในประเทศไทย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการนำตัวอย่างคอนกรีตจากสถานที่ก่อสร้างต่างๆ ที่ส่งมา

RECEIVED 2 March, 2004

ACCEPTED 23 July, 2004

ทดสอบกำลังอัดที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งมีการทดสอบอยู่ทุกวันและต้องทำการกำจัดทิ้งมาเรื่อยๆเพื่อทำเป็นมวลรวมทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งผลการศึกษานอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียจากการจัดหาพื้นที่สำหรับทิ้งเศษคอนกรีตเหล่านั้นแล้ว ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการช่วยอนุรักษ์พลังงานและใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า

**2. วัตถุประสงค์**

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบกำลังอัด, ผลกระทบที่มีต่อคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเมื่อใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบจากการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม

**3. วิธีการศึกษา**

**3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย**

- ปูนซีเมนต์ : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีองค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 1
- เถ้าถ่านหิน : เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง มีองค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 1
- มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ : ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 (4.75 มม.)
- มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ : หินปูนย่อยร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน 3/4 นิ้ว (19 มม.)
- มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีต : ส่วนที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม.
- มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต : ส่วนที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีขนาดระหว่าง 4.75 ถึง 19 มม.
- น้ำ : น้ำประปา

**3.2 การเตรียมวัสดุ**

นำคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. และสูง 30 ซม. ที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดจนแตกหักเสียหายซึ่งได้จากห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แยกตามกำลังอัดที่ทดสอบออกเป็น 3 กลุ่มคือ ระหว่าง 180-250, 250-400 และ 400-550 กก/ซม<sup>2</sup> สกัดเอากำมะถันที่อยู่ผิวหน้าออก จากนั้นนำคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดในช่วงดังกล่าวไปย่อยด้วยเครื่องย่อย

คอนกรีตแบบ Hammer Mills ดังรูปที่ 1 มวลรวมที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 (ขนาดเล็กกว่า 4.75 มม.) คือมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต สำหรับมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตคือส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 (ขนาดใหญ่กว่า 4.75 มม.) และมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มม. สำหรับทรายแม่น้ำนำไปล้างน้ำสะอาดแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ส่วนหินปูนย่อยใช้ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มม.

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของวัสดุประสาน

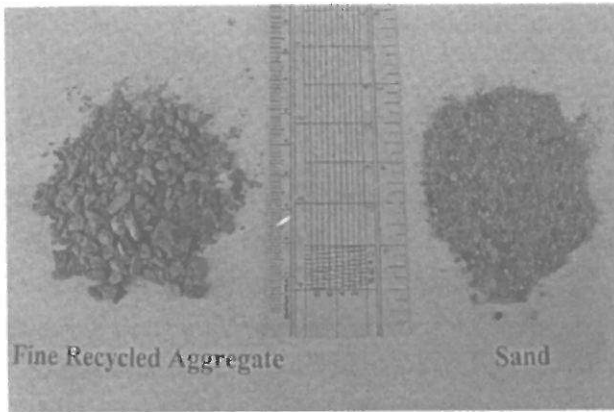
Chemical Composition (%)		Cement	Fly Ash (Mae-Moh)
Silicon Dioxide	(SiO <sub>2</sub> )	20.80	44.95
Aluminium Oxide	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.50	23.70
Iron Oxide	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.16	10.80
Calcium Oxide	(CaO)	64.97	13.80
Magnesium Oxide	(MgO)	1.06	3.47
Sodium Oxide	(Na <sub>2</sub> O)	0.08	0.07
Potassium Oxide	(K <sub>2</sub> O)	0.55	2.38
Sulfur Trioxide	(SO <sub>3</sub> )	2.96	1.31
Loss On Ignition	(LOI)	2.89	0.52



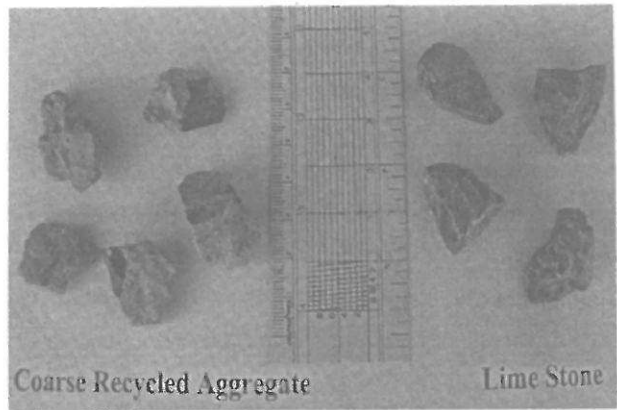
รูปที่ 1 เครื่องย่อยคอนกรีตแบบ Hammer Mills

**3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม**

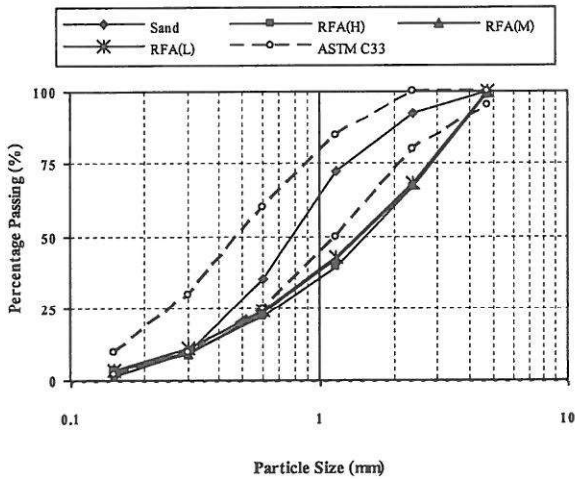
มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สภาพผิวขรุขระ มีซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวม แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 การกระจายขนาดของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 33 แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ พบว่า มวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีการกระจายขนาดไม่สม่ำเสมอ ขนาดค่อนข้างหยาบเมื่อเทียบกับทรายแม่น้ำ ขณะที่มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีการกระจายขนาดใกล้เคียงกับหินปูนย่อย และสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C 33



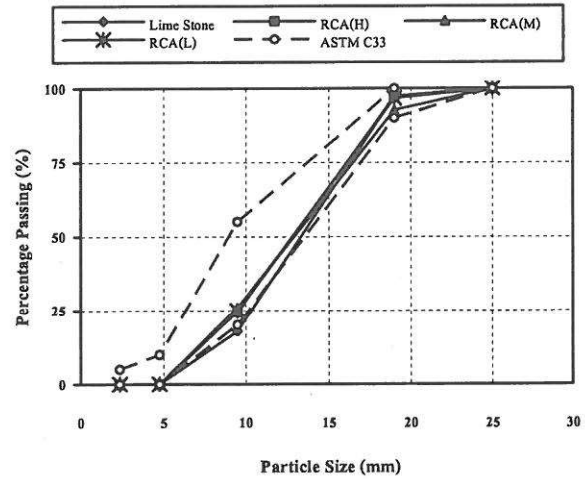
รูปที่ 2 มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต และ มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ (ทรายแม่น้ำ)



รูปที่ 3 มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต และ มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (หินปูนย่อย)



รูปที่ 4 การกระจายขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 5 การกระจายขนาดละเอียดของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมพบว่า มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนและโพรงอากาศของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมส่งผลให้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตดังกล่าวมีน้ำหนักเบากว่ามวลรวมจากธรรมชาติ [2] สำหรับอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมวลรวมมีขนาดเล็ก โดยมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีอัตราการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 5.20 ถึง 5.46 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8.03 ถึง 9.62 สำหรับมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต ขณะที่ความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตที่นำมาย่อย โดยมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการสึกกร่อนที่ทดสอบด้วยเครื่องลอสแองเจลิส ตามมาตรฐาน ASTM C 131 [5] คิดเป็นร้อยละ 29.69, 30.95 และ 33.50 สำหรับมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ

คอนกรีตที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 400-550, 250-400 และ 180-250 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

Aggregate	Specific Gravity	Water Absorption (%)	Fineness Modulus	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	Void (%)	Abrasion Loss (%)
River Sand	2.56	0.94	2.90	1695	32.86	-
RFA(H)	2.13	8.03	3.58	1432	34.21	-
RFA(M)	2.39	9.62	3.55	1399	34.96	-
RFA(L)	2.41	9.52	3.50	1370	35.74	-
Lime Stone	2.71	0.39	6.85	1672	39.04	22.43
RCA(H)	2.39	5.46	6.78	1347	39.99	29.69
RCA(M)	2.31	5.20	6.81	1343	41.27	30.95
RCA(L)	2.45	5.38	6.78	1327	41.48	33.50

3.4 ส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยนี้ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (CTR500) ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 500 กก/ซม<sup>2</sup> อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.45 และมีค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 11 ถึง 16 ซม.

สำหรับส่วนผสมคอนกรีตแบ่งเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นคอนกรีตควบคุม (CTR500) ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว มีหินปูนย่อยและทรายแม่น้ำเป็นมวลรวม กลุ่มที่สองเป็นคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดร่วมกับมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตทดแทนหินปูนย่อยทั้งหมด กลุ่มที่สามเป็นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตทดแทนหินปูนย่อยทั้งหมดและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำร้อยละ 30, 50, 70 และ 100 โดยน้ำหนัก ส่วนกลุ่มสุดท้ายเป็นคอนกรีตที่ใช้ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 250 ถึง 400 กก/ซม<sup>2</sup> เป็นส่วนผสมร่วมกับการใช้เม็ดถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และเม็ดถ่านหิน) สำหรับส่วนผสมคอนกรีตในงานวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย

Symbol	Mix Proportion (kg/m <sup>3</sup> )							W/B	Slump (mm)	
	OPC	F	Sand	Lime Stone	RFA	RCA	Mixing Water			Effective Water
CTR 500	484	-	649	976	-	-	218	218	0.45	150
RCH <sub>100</sub>	484	-	648	-	-	954	240	218	0.45	150
RCM <sub>100</sub>	484	-	648	-	-	957	238	218	0.45	155
RCL <sub>100</sub>	484	-	648	-	-	957	238	218	0.45	145
RCM <sub>100</sub> F <sub>20</sub>	387	97	648	-	-	957	238	218	0.45	165
RFH <sub>30</sub>	484	-	455	-	187	954	247	218	0.45	155
RFH <sub>50</sub>	484	-	325	-	312	954	253	218	0.45	155
RFH <sub>70</sub>	484	-	195	-	436	954	258	218	0.45	125
RFH <sub>100</sub>	484	-	-	-	622	954	266	218	0.45	115
RFM <sub>30</sub>	484	-	455	-	185	957	247	218	0.45	145
RFM <sub>50</sub>	484	-	325	-	309	957	253	218	0.45	140
RFM <sub>70</sub>	484	-	195	-	432	957	260	218	0.45	150
RFM <sub>100</sub>	484	-	-	-	618	957	269	218	0.45	140
RFL <sub>30</sub>	484	-	455	-	187	957	247	218	0.45	160
RFL <sub>50</sub>	484	-	325	-	311	957	251	218	0.45	140
RFL <sub>70</sub>	484	-	195	-	436	957	257	218	0.45	130
RFL <sub>100</sub>	484	-	-	-	622	957	265	218	0.45	120
RFM <sub>30</sub> F <sub>20</sub>	387	97	455	-	185	957	247	218	0.45	155
RFM <sub>50</sub> F <sub>20</sub>	387	97	325	-	309	957	253	218	0.45	150
RFM <sub>70</sub> F <sub>20</sub>	387	97	195	-	432	957	260	218	0.45	110
RFM <sub>100</sub> F <sub>20</sub>	387	97	-	-	618	957	269	218	0.45	115

\*\* อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเมื่อมวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)

โดยสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีลักษณะดังนี้คือ

$$R\{C, F\}\{L, M, H\}_{xx} \{F_{20}\}$$

RC{L, M, H} <sub>xx</sub> หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดทั้งหมดร่วมกับมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยในอัตราส่วนร้อยละ xx โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ

RF{L, M, H} <sub>xx</sub> หมายถึง คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดและใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำในอัตราส่วนร้อยละ xx โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด

L, M, และ H เป็นมวลรวมซึ่งได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 180-250, 250-400 และ 400-550 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ส่วน F<sub>20</sub> หมายถึงการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเม็ดถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังนั้น RFM<sub>30</sub>F<sub>20</sub> หมายถึงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตซึ่งได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 250-400 กก/ซม<sup>2</sup> แทนที่ทรายแม่น้ำในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเม็ดถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

3.5 การทดสอบ

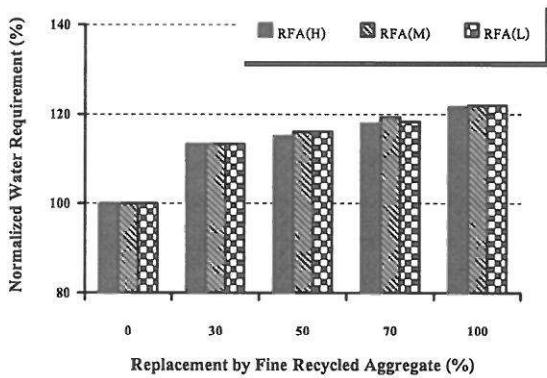
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. หลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1 วัน คอนกรีตส่วนที่เหลือนำไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วันตามลำดับ พร้อมทั้งหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการสมการของ ว.ส.ท. 1008 [1]

4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติของคอนกรีตสด

งานวิจัยนี้กำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตอยู่ที่ 11 ถึง 16 ซม. ทุกส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.45 โดยแต่ละส่วนผสมมีการชดเชยปริมาณการดูดซึมน้ำเนื่องจากมวลรวมที่แตกต่างกัน ในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมต้องใช้น้ำในปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวตามที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมจาก

ธรรมชาติ โดยปริมาณน้ำที่ใช้สำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมคิดเป็นร้อยละ 110 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมและเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 113 ถึง 123 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม โดยปริมาณน้ำมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตที่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ ลักษณะผิวที่ขรุขระและความเป็นเหลี่ยมมุม ประกอบกับการกระจายขนาดที่ไม่สม่ำเสมอของมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทลดกลง การทำให้แน่นและตกแต่งผิวหน้าของคอนกรีตทำได้ยากขึ้นกว่าคอนกรีตควบคุม (CTR500) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมที่ใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำในปริมาณที่สูงขึ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของปริมาณน้ำที่ใช้กับร้อยละการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต

ตารางที่ 4 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของมวลรวมละเอียดจาก

ตารางที่ 4 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

Elapsed Time (minute)	Slump of Concrete (mm)										
	CTR500	RCM <sub>100</sub>	RFM <sub>30</sub>	RFM <sub>50</sub>	RFM <sub>70</sub>	RFM <sub>100</sub>	RCM <sub>100</sub> F <sub>20</sub>	RFM <sub>30</sub> F <sub>20</sub>	RFM <sub>50</sub> F <sub>20</sub>	RFM <sub>70</sub> F <sub>20</sub>	RFM <sub>100</sub> F <sub>20</sub>
0	130	120	100	100	105	100	115	120	125	135	110
15	100	80	75	70	60	50	85	95	95	80	60
30	80	60	45	60	50	35	70	80	65	55	45
45	60	50	35	40	30	20	60	60	45	45	30
60	50	40	30	35	20	15	50	45	40	40	25
75	45	30	20	25	10	0	30	25	35	30	15
90	35	25	10	15	0	-	25	15	10	15	0
105	25	10	0	0	-	-	15	10	0	0	-
120	10	0	-	-	-	-	10	0	-	-	-
135	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-

การย่อยเศษคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมดังกล่าวมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ อย่างไรก็ตามส่วนผสมที่ใช้แฉ่ด้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานช่วยยืดระยะเวลาในการสูญเสียค่าการยุบตัวให้นานขึ้นประมาณ 15 นาที เนื่องจากการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของแฉ่ด้านหินส่งผลให้คอนกรีตดังกล่าวมีระยะเวลาในการก่อตัวยืดออกไป [6]

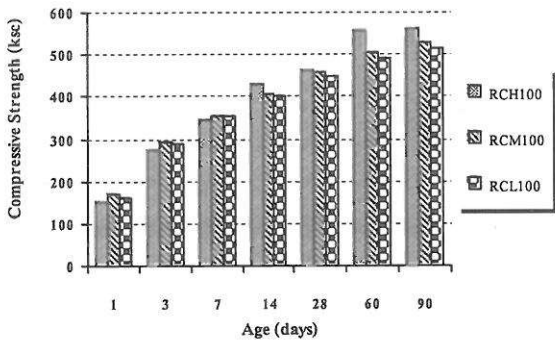
สำหรับกำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้ย่อยเป็นมวลรวมพบว่าเมื่อผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดไม่มากนัก โดยคุณสมบัติของคอนกรีตสดดังกล่าวมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นหลัก

#### 4.2 ผลกระทบเนื่องจากกำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้ย่อยเป็นมวลรวม

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆเมื่อใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีช่วงกำลังอัดแตกต่างกัน พบว่ากำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้ย่อยเป็นมวลรวมหยาบไม่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วันแรก เนื่องจากเป็นช่วงที่คอนกรีตมีกำลังอัดไม่สูงนัก กำลังอัดของคอนกรีตส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์และการยึดเกาะกันระหว่างเพสต์กับมวลรวม โดยกำลังอัดของคอนกรีต RCL<sub>100</sub>, RCM<sub>100</sub> และ RCH<sub>100</sub> ที่อายุ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 353, 354 และ 347 กก/ซม<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละ 88, 89 และ 87 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ

กำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้ย่อยเป็นมวลรวมหยาบมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น โดยกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้น โดยที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีต RCL<sub>100</sub>, RCM<sub>100</sub> และ RCH<sub>100</sub> มีค่าเท่ากับ 450, 459 และ 463 กก/ซม<sup>2</sup> หรือ

คิดเป็นร้อยละ 85, 86 และ 87 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และมีค่าเท่ากับ 514, 527 และ 560 กก/ซม<sup>2</sup> เมื่อคอนกรีต RCL<sub>100</sub>, RCM<sub>100</sub> และ RCH<sub>100</sub> มีอายุ 90 วัน หรือคิดเป็นร้อยละ 87, 89 และ 95 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hansen และ Narud [7] ที่พบว่ากำลังของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตที่นำมาใช้ย่อยเป็นมวลรวม



รูปที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ กันเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีช่วงกำลังอัดแตกต่างกัน

สำหรับกำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้ย่อยเป็นมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีต พบว่าไม่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมากนัก เพราะกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตมากกว่า ดังผลการทดสอบกำลังอัดในตารางที่ 5

#### 4.3 ผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อแทนที่หินปูนย่อยด้วยมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าการใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตทุกอายุทดสอบมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 13 ถึง 15 โดยที่อายุ 28 วันกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าระหว่าง 450 ถึง 463 กก/ซม<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละ 85 ถึง 87 ของคอนกรีตควบคุม ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน มีค่าระหว่าง 514 ถึง 560 กก/ซม<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละ 87 ถึง 95 ของคอนกรีตควบคุม เนื่องจากซีเมนต์โพสท์หรือมอร์ตาร์ที่ซึ่คเกาะ

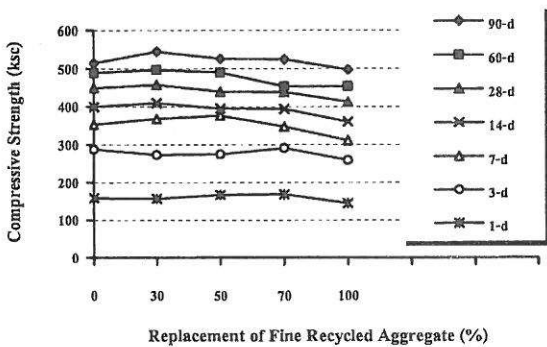
ตารางที่ 5 กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

Symbol	Compressive Strength (ksc) / Normalized Compressive Strength (%)							Modulus of Elasticity at 28 days		Over/Under
	1-d	3-d	7-d	14-d	28-d	60-d	90-d	Measure (10 <sup>5</sup> ksc)	E.I.T [1] (10 <sup>5</sup> ksc)	
CTR 500	171/100	327/100	400/100	455/100	530/100	561/100	591/100	4.023	3.476	15.74
RCH <sub>100</sub>	153/89	274/84	347/87	431/95	463/87	556/99	560/95	2.948	3.249	-9.26
RCM <sub>100</sub>	171/100	291/89	354/89	408/90	459/86	506/90	527/89	2.815	3.235	-12.98
RCL <sub>100</sub>	159/93	288/88	353/88	400/88	450/85	489/87	514/87	2.937	3.203	-8.30
RCM <sub>100</sub> F <sub>20</sub>	137/80	247/76	318/80	368/81	462/87	507/90	548/93	2.864	3.246	-11.77
RFH <sub>30</sub>	169/99	301/92	361/90	423/93	468/88	507/90	561/95	2.663	3.267	-18.49
RFH <sub>50</sub>	154/90	297/91	350/88	394/87	456/86	543/97	571/97	2.526	3.224	-21.65
RFH <sub>70</sub>	168/98	326/100	356/89	409/90	450/85	486/87	523/88	2.519	3.203	-21.35
RFH <sub>100</sub>	167/98	304/93	334/84	410/90	434/82	461/82	500/85	2.341	3.146	-25.59
RFM <sub>30</sub>	172/101	327/100	399/100	450/99	471/89	543/97	579/98	2.759	3.277	-15.81
RFM <sub>50</sub>	171/100	303/93	369/92	425/93	444/84	492/88	533/90	2.516	3.182	-20.93
RFM <sub>70</sub>	188/110	297/91	395/99	440/97	450/85	481/86	522/88	2.479	3.203	-22.60
RFM <sub>100</sub>	165/96	265/81	389/97	400/88	424/80	470/84	501/85	2.416	3.109	-22.29
RFL <sub>30</sub>	157/92	273/83	369/92	410/90	458/86	497/89	545/92	2.772	3.232	-14.23
RFL <sub>50</sub>	167/98	274/84	377/94	395/87	440/83	490/87	526/89	2.711	3.167	-14.40
RFL <sub>70</sub>	169/99	291/89	347/87	394/87	439/83	454/81	524/89	2.695	3.164	-14.82
RFL <sub>100</sub>	145/85	259/79	311/78	360/79	412/78	454/81	497/84	2.311	3.065	-24.60
RFM <sub>30</sub> F <sub>20</sub>	134/78	247/76	322/81	377/83	437/82	499/89	529/90	2.613	3.157	-17.23
RFM <sub>50</sub> F <sub>20</sub>	132/77	230/70	295/74	356/78	417/79	494/88	532/90	2.517	3.084	-18.39
RFM <sub>70</sub> F <sub>20</sub>	124/73	225/69	301/75	317/70	443/84	485/86	523/88	2.331	3.178	-26.65
RFM <sub>100</sub> F <sub>20</sub>	117/68	192/59	272/68	329/72	348/66	426/76	460/78	2.184	2.816	-22.47

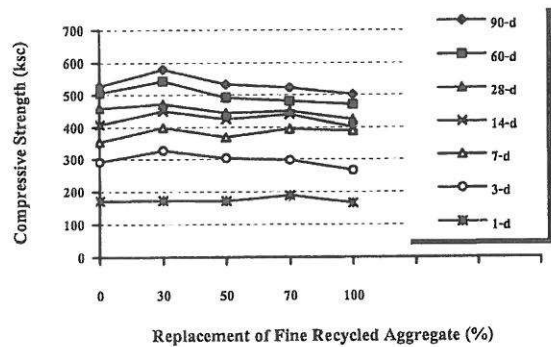
ที่ผิวของมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีความแข็งแรงน้อยกว่า หินปูนย่อย เมื่อพิจารณาค่าการสึกกร่อนของมวลรวม พบว่ามวลรวม หยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการสึกกร่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 29.69 ถึง 33.50 ขณะที่หินปูนย่อยมีค่าการสึกกร่อนร้อยละ 22.43 ส่งผลให้ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

**4.4 ผลกระทบต่อกำลังอัดเมื่อใช้ทั้งมวลรวมหยาบและ ละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นมวลรวม**

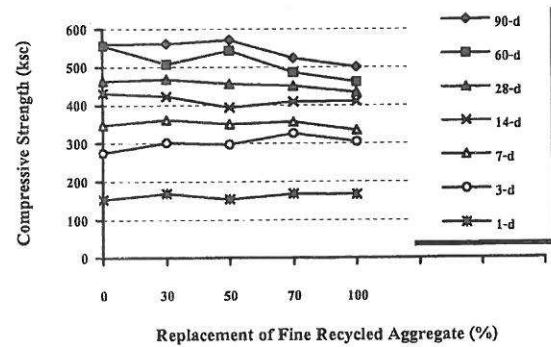
รูปที่ 8 ถึง 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของ คอนกรีตที่อายุต่างๆกับปริมาณการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยมวลรวมละเอียด จากการย่อยเศษคอนกรีต เมื่อพิจารณาผลรวมละเอียดที่ได้จากการย่อย เศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วงเดียวกัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมี แนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อย เศษคอนกรีตที่สูงขึ้น โดยการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อย เศษคอนกรีตร้อยละ 30 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีค่าลดลง ร้อยละ 11 ถึง 14 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และลดลงร้อยละ 14 ถึง 17 เมื่อแทนที่ร้อยละ 50 และ 70 ส่วนการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการ ย่อยเศษคอนกรีตร้อยละ 100 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงร้อยละ 18 ถึง 22 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการ ย่อยเศษคอนกรีตที่สูงขึ้น อีกทั้งมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต มีขนาดค่อนข้างใหญ่ การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและมีปริมาณช่องว่าง ระหว่างมวลรวมสูงกว่าทรายแม่น้ำคิดเป็นร้อยละ 1.4 ถึง 2.94 ส่งผลให้ คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม โดยกำลังอัดของ คอนกรีตที่อายุ 90 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมคิดเป็นร้อยละ 2 ถึง 8, 3 ถึง 11, 11 ถึง 12 และ 15 ถึง 16 เมื่อแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการ ย่อยเศษคอนกรีตร้อยละ 30, 50, 70 และ 100 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ กับ ร้อยละการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษ คอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 180 ถึง 250 กก/ซม<sup>2</sup>



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ กับ ร้อยละการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษ คอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 250 ถึง 400 กก/ซม<sup>2</sup>



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ กับ ร้อยละการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษ คอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 400 ถึง 550 กก/ซม<sup>2</sup>

อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดที่อายุต้นๆ ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทราย แม่น้ำทุกร้อยละการแทนที่ มีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็น มวลรวมละเอียดเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุ 7 วันแรก เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้นๆมีค่าขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของปูนซีเมนต์เป็นหลัก ขณะที่ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ค่อนข้างสูงคือ 484 กก/ม<sup>3</sup> นอกจากนี้อนุภาคที่มีขนาดเล็กของปูนซีเมนต์ ยังสามารถแทรกเข้าไปอุดช่องว่างต่างๆ ในเนื้อคอนกรีตได้ดี ซึ่งช่วยลด ผลกระทบที่เกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของมวลรวม ละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีต่อความอัดแน่นและกำลังอัดของ คอนกรีต เช่น การกระจายขนาดที่ไม่สม่ำเสมอและปริมาณช่องว่าง ระหว่างมวลรวมสูง ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นๆของ คอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าไม่ แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้น พบว่ากำลัง

อัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตที่สูงขึ้น

#### 4.5 ผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร่วมกับการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานร่วมกับการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าการพัฒนา กำลังอัดที่อายุต้นมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมมาก เห็นได้ชัดในส่วนผสมที่ใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้น โดยคอนกรีต RFM<sub>30</sub>F<sub>20</sub>, RFM<sub>50</sub>F<sub>20</sub>, RFM<sub>70</sub>F<sub>20</sub> และ RFM<sub>100</sub>F<sub>20</sub> มีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 322, 295, 301 และ 272 กก/ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตควบคุมมีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 400 กก/ซม<sup>2</sup> ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตมีปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมสูงเมื่อเทียบกับทรายแม่น้ำ การกระจายขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้การใช้เถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมยังเป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้นมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น โดยที่อายุ 28 วันกำลังอัดของคอนกรีต RFM<sub>30</sub>F<sub>20</sub>, RFM<sub>50</sub>F<sub>20</sub>, RFM<sub>70</sub>F<sub>20</sub> และ RFM<sub>100</sub>F<sub>20</sub> มีค่าเท่ากับ 437, 417, 443 และ 348 กก/ซม<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละ 82, 79, 84 และ 66 ของคอนกรีตควบคุม และเพิ่มขึ้นเป็น 529, 532, 523 และ 460 กก/ซม<sup>2</sup> เมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วัน หรือคิดเป็นร้อยละ 89, 90, 88 และ 78 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ Ca(OH)<sub>2</sub> ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้คอนกรีตดังกล่าวมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้น

#### 4.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่าง 218400 ถึง 294800 กก/ซม<sup>2</sup> ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 402300 กก/ซม<sup>2</sup> เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันมาก

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของ ว.ส.ท. 1008 [1] ที่แสดงดังสมการที่ 1

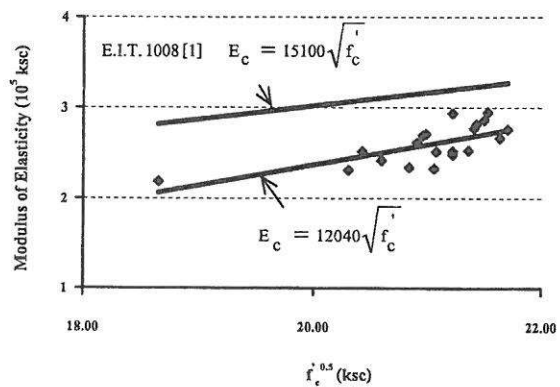
$$E_c = 15100\sqrt{f'_c} \quad \text{กก/ซม}^2 \quad (1)$$

พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับทรายแม่น้ำมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการของ ว.ส.ท. 1008 [1] อยู่ในช่วงร้อยละ 8 ถึง 13 และค่าร้อยละความแตกต่างมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำในปริมาณที่สูงขึ้น โดยโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการของ ว.ส.ท. 1008 [1] อยู่ในช่วงร้อยละ 14 ถึง 26 ทั้งนี้เนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมจากธรรมชาติ นอกจากนี้การกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต ทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าลดลง สำหรับการให้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมากนัก เนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าขึ้นอยู่กับโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมและปริมาณของมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสม [8]

อย่างไรก็ตาม จากความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกำลังอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม แสดงดังรูปที่ 11 พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ทดสอบมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้น โดยมีสมการแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม แสดงดังสมการที่ 2

$$E_c = 12040\sqrt{f'_c} \quad \text{กก/ซม}^2 \quad (2)$$

เมื่อ E คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต, กก/ซม<sup>2</sup>  
 f'<sub>c</sub> คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีต, กก/ซม<sup>2</sup>



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการทดลองและจากค่าที่แนะนำโดย ว.ส.ท. 1008 [1]

สำหรับผลกระทบจากกำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้  
 ย่อยเป็นมวลรวมที่มีต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต พบว่ายังเห็นผล  
 ไม่ชัดเจน ขณะที่ Hansen และ Boegh [9] พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ  
 คอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่  
 มีกำลังอัดสูงขึ้น

## 5 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มี  
 กำลังอัดต่างกันระหว่าง 180-250, 250-400 และ 400-550 กก/ชม<sup>2</sup> ในการ  
 ทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติในงานคอนกรีตสรุปได้ดังนี้

1. การดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่  
 ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ส่งผลให้  
 คอนกรีตสดมีการสูญเสียการยุบตัวเร็วขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผสม  
 ที่ใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น อย่างไร  
 ก็ตามการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนช่วยเพิ่มความสามารถ  
 ในการเทและยึดระยะเวลาในการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต  
 ออกไป

2. มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตสามารถใช้ทดแทน  
 หินปูนย่อยได้โดยไม่ส่งผลต่อคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมาก  
 นัก นอกจากนี้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษ  
 คอนกรีตร่วมกับทรายแม่น้ำมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 85 ของคอนกรีต  
 ควบคุม และกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการ  
 ย่อยเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้นไปเป็นส่วนผสม

3. กำลังอัดของเศษคอนกรีตระหว่าง 180-550 กก/ชม<sup>2</sup> ที่  
 นำมาใช้ย่อยเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตไม่มีผลต่อกำลังอัดของ  
 คอนกรีต ขณะที่ปริมาณการแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษ  
 คอนกรีตส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยมีค่าลดลง  
 ตามปริมาณการแทนที่ที่สูงขึ้น และมีค่าลดลงไม่เกินร้อยละ 22 ของ  
 คอนกรีตควบคุม นอกจากนี้การใช้มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษ  
 คอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตสดมี  
 ความสามารถในการเทลดลง

4. กำลังอัดของเศษคอนกรีตที่นำมาใช้ย่อยเป็นมวลรวมมี  
 ผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมก่อนข้างน้อย ยกเว้นค่าความ  
 ด้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดเศษคอนกรีต  
 ที่นำมาย่อย ขณะที่การใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตที่มีช่วง  
 กำลังอัดระหว่าง 180 ถึง 550 กก/ชม<sup>2</sup> ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของ  
 คอนกรีตสด

5. การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ใน  
 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดที่ต่ำ  
 ในช่วงอายุต้นๆ โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วันมีค่าระหว่าง 272 ถึง  
 322 กก/ชม<sup>2</sup> หรือคิดเป็นร้อยละ 68 ถึง 81 ของคอนกรีตควบคุม แต่เมื่ออายุ

มากขึ้น คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงขึ้น โดยที่  
 อายุ 90 วันกำลังอัดของคอนกรีตดังกล่าวมีค่าระหว่าง 460 ถึง 529 กก/ชม<sup>2</sup>  
 หรือคิดเป็นร้อยละ 78 ถึง 90 ของคอนกรีตควบคุม

6. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อย  
 เศษคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 218400 ถึง 294800 กก/ชม<sup>2</sup> โดยมีค่าแสดงคัง  
 สมการ  $E_c = 12040\sqrt{f'_c}$  กก/ชม<sup>2</sup> เมื่อ  $f'_c$  มีค่าอยู่ในช่วง 370 ถึง 470  
 กก/ชม<sup>2</sup> เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของ ว.ส.ท. 1008 [1]  
 พบว่ามีค่าต่ำกว่าประมาณร้อยละ 8 ถึง 27

## เอกสารอ้างอิง

1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ว.ส.ท.  
 1008 : มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง,  
 พ.ศ.2545, พิมพ์ครั้งที่ 4, หน้า 31
2. Katz, A., "Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate  
 from Partially Hydrated Old Concrete," Cement and Concrete  
 Research, Vol. 33, No. 5, 2003, pp. 703-711.
3. Tavakoli, M., and Soroushian, P., "Strength of Recycled Aggregate  
 Concrete Made Using Field-Demolished Concrete as Aggregate,"  
 ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 2, 1996, pp. 182-190.
4. Malhotra, V.M., "Use of Recycled Concrete as a New  
 Aggregate," Proceedings of Symposium on Energy and  
 Resource Conversation in the Cement and Concrete Industry,  
 CANMET Report 76-8, Ottawa, Canada, 1978, pp. 4-16
5. American Society for Testing and Materials, "ASTM C 131-96 :  
 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-  
 Size Coarse Aggregate by Abrasion and Standards," In 1997  
 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia,  
 ASTM, 1997, pp. 74-77.
6. Chutubtim, S., Songpiriyakij, S., Jaturapitakkul, C., and  
 Kiattikomol, K., "A Study on Properties and Compressive  
 Strength of 5-Source Fly Ash Concrete," Proceedings of Inter-  
 Regional Symposium on Sustainable Development (ISSD), 18-  
 19 May, 1999, pp. 360-369.
7. Hansen, T.C., and Narud, H., "Strength of Recycled Concrete  
 Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate," Concrete  
 International-Design and Construction, Vol. 5, No. 1, 1983,  
 pp. 79-83.

8. Neville, A.M., "Aggregate bond and Modulus of Elasticity of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 1, 1997, pp. 71-74.
9. Hansen, T.C., and Boegh, E., "Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled-Aggregate Concrete," *ACI Journal*, Vol. 82, No. 5, 1985, pp. 648-652.