

การศึกษาอัตราส่วนผสมยิปซัมต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา



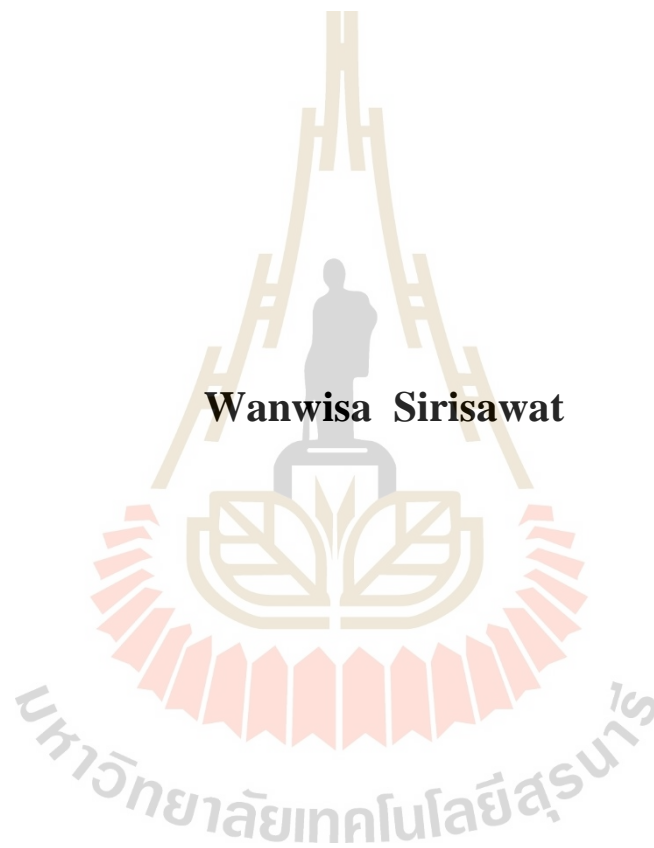
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

**STUDY OF GYPSUM ADMIXTURE ON MECHANICAL
PROPERTIES FOR LIGHTWEIGHT CONCRETE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Manufacturing Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2016

ศึกษาอัตราส่วนผสมยิปซัมต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร.วรรณัช บุ่งสุด)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.กัญชลา สุดตาชาติ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



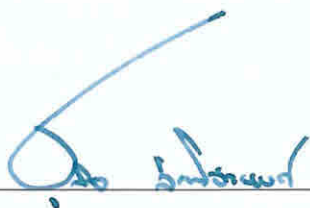
(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ



(อ. ดร.ปิยมน พัวพงศกร)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วันวิสาข์ ศิริสวัสดิ์ : การศึกษาอัตราส่วนผสมยิปซัมต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา
(STUDY OF GYPSUM ADMIXTURE ON MECHANICAL PROPERTIES FOR
LIGHTWEIGHT CONCRETE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.กัญชลา สุตตาชาติ, 93 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาอัตราส่วนผสมของยิปซัม (เศษยิปซัม) ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วน โดยมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และ 0.7 ตามลำดับ การแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษยิปซัมโดยน้ำหนักร้อยละ 5 15 30 50 70 และ 100 ตามลำดับ ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และอายุบ่มเท่ากับ 7 14 28 และ 60 วัน จากนั้นนำมาศึกษาสมบัติต่าง ๆ โดยในงานวิจัยประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุยิปซัมและมวลรวมละเอียด กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน การหดตัวแห้ง การขยายตัวของคอนกรีต และโครงสร้างทางจุลภาค

ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมในคอนกรีตมวลเบา ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นและมีการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัม รวมถึงค่าการนำความร้อนสูงขึ้นและสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสร์ปกติ นอกจากนี้ยังส่งผลให้การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาช้าลง การขยายตัวของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตมีมากขึ้น การวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค พบว่าเศษยิปซัมในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสร์มีการกระจายตัวได้ดี การวิเคราะห์ภาพถ่ายผิวการแตกหัก พบว่าหากปริมาณการแทนที่ของยิปซัมมากขึ้น จะมีผลึกเอ็ททริงไคต์มากและใหญ่ขึ้น สำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมในคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดผลึกเอ็ททริงไคต์มากขึ้นและมีมากกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบปกติ

ผลจากการศึกษาครั้งนี้ทำให้ทราบถึงผลกระทบของเศษยิปซัมต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสร์ ซึ่งพบว่าการแทนที่ทรายร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีศักยภาพมากพอในการนำไปใช้งานตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา วันวิสาข์ ศิริสวัสดิ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กัญชลา สุตตาชาติ

WANWISA SIRISAWAT : STUDY OF GYPSUM ADMIXTURE ON
MECHANICAL PROPERTIES FOR LIGHTWEIGHT CONCRETE.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KANCHALA SUDTACHAT,
Ph.D., 93 PP.

GYPSUM / COMPRESSIVE STRENGTH / LIGHTWEIGHT CONCRETE /
RECYCLING

This research presents experimental results of gypsum admixture on mechanical properties for lightweight concrete (CLC) as fine aggregate (scrap gypsum) to partially replace river sand. The ratio of binder to fine aggregate and the ratio of water to binder are 1.0 and 0.7 respectively. The replaced river sand with gypsum by weight are 5 to 100 % respectively. The controlled density of concrete were 1,100 and 1,300 kg/m³ at curing age of 7, 14, 28 and 60 days.

It was found that replacing sand with gypsum in concrete. The compressive strength and water absorption of concrete volume increased by replacing sand with gypsum. In addition, the small increment of thermal conductivity were found as the amount of gypsum increase. It was found that replacing the sand with gypsum resulted in decrease of the concrete shrinkage. The gypsum could be considered to acts like retarder. It was also found that the expansion in sodium sulfate solution of the concrete increased as the amount of gypsum increase. From SEM and XRD results, it was found that increase of gypsum amount leads to greater amount ettringite and may result in cracking of the concrete. It would be suggested that the replacement amount 5% is appropriated to recycle. The gypsum waste as fine aggregate in lightweight concrete.

School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature

วณิชชากร สิริสวัสดิ์

Advisor's Signature

กชชลา สุตชาติ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งทางด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ สนับสนุนทุน และอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคลากรประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการเข้าใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ และบริษัท คณิตโฟท์ จำกัดที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาเศษยิปซัมที่ใช้ในการงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุตาชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือที่ดีมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอบคุณ ที่ได้สนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการดำเนินงานตลอดทั้งการทำงานวิจัย เพื่อช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดี ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้ เป็นผลมาจากความกรุณาจากผู้ที่เกี่ยวข้องมาทั้งสิ้น ทางคณะผู้วิจัยจึงหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มาศึกษาต่อ

วันวิสาข ตรีศิวศัศดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ยิปซัม.....	5
2.2 คอนกรีตมวลเบา.....	6
2.3 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูโลส.....	8
2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	8
2.3.2 มวลรวมละเอียด.....	10
2.3.3 น้ำ.....	10
2.3.4 สารเพิ่มฟอง.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.5	สรุป.....	14
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1	บทนำ.....	15
3.2	วัสดุ.....	15
3.2.1	ปูนซีเมนต์.....	15
3.2.2	ทราย.....	16
3.2.3	เศษอิปซัม.....	16
3.2.4	น้ำ.....	17
3.2.5	สารเพิ่มฟอง.....	18
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	18
3.3.1	เครื่องร่อนแยกขนาด.....	18
3.3.2	เครื่องผสม.....	19
3.3.3	เครื่องอัดอากาศและเครื่องสร้างโฟม.....	19
3.3.4	ภาชนะและเครื่องชั่งน้ำหนักคอนกรีตสด.....	20
3.3.5	แบบหล่อมาตรฐาน.....	21
3.3.6	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	22
3.3.7	เครื่องทดสอบการนำความร้อน.....	22
3.3.8	ตู้อบลมร้อน.....	23
3.3.9	เครื่องวัดขนาด.....	24
3.4	การทดสอบสมบัติของวัสดุ.....	24
3.4.1	การออกแบบส่วนผสม.....	24
3.4.2	การเตรียมโฟม.....	24
3.4.3	การหล่อตัวอย่าง.....	25
3.4.4	การถอดแบบและการบ่ม.....	25
3.4.5	การทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.6	การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ.....	26
3.4.7	การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ.....	26
3.4.8	การวิเคราะห์ขนาดคละ	27
3.5	การวิเคราะห์ระดับจุลภาค	28
3.5.1	กล้องจุลทรรศน์	28
3.5.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
3.5.3	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	29
3.6	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	31
3.6.1	การออกแบบส่วนผสม.....	31
3.6.2	การเตรียมเศษยิปซัม.....	32
3.6.3	การเตรียมโฟม	33
3.6.4	การหล่อขึ้นทดสอบ	33
3.6.5	การถอดแบบและการป่ม.....	34
3.7	การทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	34
3.7.1	การทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	34
3.7.2	การทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	35
3.7.3	การทดสอบการนำความร้อน	35
3.7.4	การทดสอบการหดตัวแห้งของคอนกรีต	36
3.7.5	การทดสอบการขยายตัวของคอนกรีต.....	37
3.8	แผนภาพการดำเนินงานวิจัย	38
3.9	สรุป.....	39
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1	บทนำ.....	40
4.2	สมบัติของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียดทางเคมี	40
4.2.1	องค์ประกอบทางเคมี	41
4.3	การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์ออปติคอล ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	45
4.5	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	53
4.6	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	55
4.7	การทดสอบการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	57
4.8	การทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	59
4.9	การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	68
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุป	72
5.1.1	ผลกระทบจากปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษขี้ปซัม	72
5.1.2	ผลกระทบของการบ่ม	73
5.2	ข้อเสนอแนะ	73
	รายการอ้างอิง	74
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ตารางผลการทดสอบ	76
	ประวัติผู้เขียน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของฝ้ายิปซัมบอร์ดที่ใช้ในงานวิจัย (มอก. 219-2552).....	6
2.2	ชนิดของคอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน มอก. 2601	8
3.1	สมบัติทางกายภาพของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด	17
3.2	สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	32
3.3	ตารางแสดงการทดสอบและวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน	39
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	42
ก.1	การดูดซึมน้ำของเศษยิปซัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 40	77
ก.2	ตัวอย่างที่ 1 ยิปซัมที่ยังไม่ผ่านการร่อน	78
ก.3	ตัวอย่างที่ 2 ยิปซัมที่ยังไม่ผ่านการร่อน	79
ก.4	ตัวอย่างที่ 3 ยิปซัมที่ยังไม่ผ่านการร่อน	80
ก.5	ตัวอย่างที่ 4 ยิปซัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 40	81
ก.6	ตัวอย่างที่ 5 ยิปซัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 40	82
ก.7	ตัวอย่างที่ 6 ทราย:ยิปซัม (30:70)	83
ก.8	ตัวอย่างที่ 7 ทราย:ยิปซัม (50:50)	84
ก.9	ตัวอย่างที่ 8 ทราย:ยิปซัม (70:30)	85
ก.10	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	86
ก.11	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	87
ก.12	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	88
ก.13	การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$	89
ก.14	การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$	90
ก.15	การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	92

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต	9
2.2	ลักษณะของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) มีลักษณะคล้ายเข็มผลึก.....	10
3.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง	15
3.2	ทรายที่ผ่านกระบวนการร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐาน.....	16
3.3	เศษยิปซัมบอร์ค	16
3.4	แสดงขนาดส่วนกละของทรายและเศษยิปซัม.....	17
3.5	เครื่องร่อนแยกขนาด.....	18
3.6	เครื่องผสมแบบ โม้ผสมเอียง	19
3.7	เครื่องอัดอากาศ.....	20
3.8	เครื่องสร้างโฟม	20
3.9	ภาชนะและเครื่องชั่งคอนกรีตสด.....	21
3.10	แบบหล่อมาตรฐาน	21
3.11	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด	22
3.12	เครื่องทดสอบการนำความร้อน	23
3.13	ตู้อบลมร้อน	23
3.14	เครื่องวัดขนาดคอนกรีต.....	24
3.15	คอนกรีตสดที่ถูกเทลงแบบหล่อ	25
3.16	แผนภาพแสดงขนาดกละของมวลรวม	28
3.17	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM).....	29
3.18	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	30
3.19	ตัวอย่าง Diffractogram จากเครื่อง XRD ของยิปซัม	31
3.20	เศษยิปซัมที่ปั่นเป็นอนุเสกกระดาษและเศษยิปซัมที่ผ่านการร่อนแล้ว	33
3.21	การผสมโฟมในคอนกรีตมวลเบาแบบ Pre-formed foam method	33
3.22	การบ่มโดยวิธีหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน	34
3.23	แผนการดำเนินงานวิจัย.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	ภาพขยายของปูนซีเมนต์ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า 40
4.2	ภาพขยายของทราย และเศษยิปซัมด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 41
4.3	ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ 43
4.4	ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³ 44
4.5	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ 46
4.6	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน 47
4.7	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³ 47
4.8	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน 48
4.9	แสดงภาพถ่ายผิวการแตกหัก (SEM) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 5..... 49
4.10	การรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำและเศษยิปซัม..... 51
4.11	แสดงภาพถ่ายผิวการแตกหัก (SEM) ของคอนกรีตมวลเบาแบบปกติ 52
4.12	แสดงภาพถ่ายผิวการแตกหัก (SEM) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 100..... 52
4.13	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ 53
4.14	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³ 54
4.15	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ 56
4.16	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³ 56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 การหัดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³	58
4.18 การหัดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³	59
4.19 ผลการเปรียบเทียบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³	61
4.20 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ผสมเศษยิปซัมที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³	61
4.21 ผลการเปรียบเทียบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³	62
4.22 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³	63
4.23 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³	64
4.24 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³	65
4.25 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาแบบปกติ.....	66
4.26 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 30	67
4.27 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 100	67
4.28 ภาพ Diffractogram ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	68
4.29 ภาพ Diffractogram ของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ใช่สารละลายโซเดียมซิลเฟต.....	69
4.30 ภาพ Diffractogram ของคอนกรีตมวลเบาที่ใช่สารละลายโซเดียมซิลเฟต	70

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American society for testing and materials
CaO	=	แคลเซียมออกไซด์
$6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$	=	เอ็ททริงไกต์
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$	=	แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต
$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	=	Monosulphate
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	=	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	=	dehydrate
CaSO_4	=	แคลเซียมซัลเฟต
C_3A	=	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต
C_4AF	=	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์
C_3S	=	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
G00D11	=	คอนกรีตที่ไม่มีเศษขี้ปี้ผสม ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$
G00D13	=	คอนกรีตที่ไม่มีเศษขี้ปี้ผสม ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$
H_2O	=	น้ำ
K_2O	=	โพแทสเซียมออกไซด์
MgO	=	แมกนีเซียมออกไซด์
MPa	=	mega Pascal ($1 \text{ MPa} = \times 10^6 \text{ N/m}^2$)
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
Na_2SO_4	=	โซเดียมซัลเฟต
OM	=	optical microscope
OPC	=	ordinary Portland cement, type-I Portland cement
SEM	=	scanning electron microscope
SiO_2	=	ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา
SO_3	=	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์
μm	=	micrometer หรือ micron ($1 \text{ micron} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$)
W/m. K	=	Watt per meter–Kelvin
W_a	=	การดูดซึมน้ำ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

W_d	=	น้ำหนักของชั้นทดสอบเมื่อแห้ง
W_w	=	น้ำหนักของชั้นทดสอบเมื่อเปียก
XRD	=	x-ray diffraction



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยิปซัมเป็นแร่ธาตุที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง และประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุอื่นๆ เช่น ยิปซัมบอร์ด ปูนพลาสติก (มยูรี ปาลวงศ์, 2552) ปัจจุบันการขยายตัวของเศรษฐกิจทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการก่อสร้างและการรื้อถอนอาคารบ้านเรือนเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมหลายประการ อาทิ มลพิษทางอากาศ มลพิษทางเสียง น้ำเสีย และของเสีย รวมถึงขยะต่างๆ ได้แก่ เศษวัสดุก่อสร้าง ขยะและของเสียจำพวกยิปซัมอยู่เป็นจำนวนมาก การกำจัดหรือทำลายของเสียเหล่านี้สามารถทำได้ด้วยวิธีการฝังกลบ ซึ่งของเสียจำพวกยิปซัมนี้ถือเป็นต้นกำเนิดของขยะมูลฝอยและกลายเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การกำจัดและการลดปริมาณของเสียจากการก่อสร้างและการรื้อถอนจึงกลายเป็นปัญหาในวงกว้าง ในปัจจุบันแนวทางการแก้ไขปัญหาที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวางเพื่อให้มีการพัฒนาอย่างยั่งยืน คือ 3R ประกอบด้วย Reduce คือ การลดการใช้ Reuse คือ การใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่าที่สุด และ Recycle เป็นการนำหรือเลือกใช้ทรัพยากรที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่

วัสดุการก่อสร้างที่ผ่านการใช้งานแล้วจะเกิดการเสื่อมสภาพและสูญเสียคุณสมบัติบางประการ ทำให้ของเสียโดยส่วนใหญ่ถูกกำจัดด้วยวิธีรีไซเคิล ของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างและการรื้อถอนอาคารมักขนาดใหญ่และไม่เท่ากัน เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปรีไซเคิล ของเสียดังกล่าวจะถูกนำไปบดก่อนใช้งาน ซึ่งสามารถนำไปแทนมวลรวมหรือทรายในส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตได้รับการพัฒนาและปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้น เช่น คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุที่ถูกพัฒนาขึ้นและได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบาทำให้มีความสะดวกในการเคลื่อนย้าย สามารถรับแรงกดได้สูง กันความร้อนได้ดี (มยูรี ปาลวงศ์, 2552) จึงได้มีการนำวัสดุที่ผ่านการใช้งานหรือวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง และช่วยลดต้นทุนในการผลิต โดยนำยิปซัมมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากยิปซัมถือเป็นตัวหน่วง (Retarder) ช่วยชะลอการเซตตัวของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ซีเมนต์จับตัวกับวัสดุและส่วนผสมอื่นๆ ได้ หากปริมาณยิปซัมที่ใช้เป็นส่วนผสมมากเกินไปจะส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต อย่างไรก็ตามมวลของยิปซัมมีซัลเฟตรวมอยู่สูง และมีสารปนเปื้อนอย่างเช่น แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เมื่อทำปฏิกิริยากับ Monosulphate ของเฟสไฮเดรทที่มีอยู่ในซีเมนต์จะ

ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการแข็งตัวของคอนกรีตตามสมการที่ (1.1) (Gustavo Tovar-Rodríguez และคณะ, 2012)



ระยะเวลาในการแข็งตัวของคอนกรีตที่มากขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกล จนทำให้สูญเสียความแข็งแรงไป ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวในที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อหาอัตราส่วนผสมของยิปซัมที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาและไม่ทำให้คอนกรีตสูญเสียคุณสมบัติเชิงกล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาอัตราส่วนยิปซัมต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วน โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนของยิปซัมต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการป้องกันความร้อน ความต้านทานแรงอัด การหดตัวแห้ง ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และอัตราการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาอัตราส่วนยิปซัมต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วน เศษยิปซัมที่ใช้ในงานวิจัย คือ เศษยิปซัม ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการผลิตของโรงงานผลิตยิปซัม โดยมีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อ มวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 ต่อ 1 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1 ต่อ 0.7 การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัม โดยน้ำหนักร้อยละ 5 15 30 50 70 และ 100 ตามลำดับ โดยน้ำหนัก ที่การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 1,100 และ 1,300 kg/m³ และอายุบ่มเท่ากับ 7 14 28 และ 60 วัน

การศึกษสมบัติต่าง ๆ ของงานวิจัยประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซีเมนต์และมวลรวมละเอียด กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน การหดตัวแห้ง และอัตราการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมยิปซัม

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง สํารวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวบรวมข้อมูล

1.4.2 กำหนดขอบเขตการทดลอง

1.4.3 ออกแบบวิธีการทดลอง

1.4.4 เตรียมอุปกรณ์และวัสดุทดสอบ

- ทำการร่อนยิปซัมโดยตะแกรงร่อนเพื่อให้ได้ขนาดส่วนละเอียดที่เหมาะสมตามมาตรฐานเพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียด

1.4.5 ดำเนินการผสมส่วนผสมตามที่ได้ออกแบบไว้

1.4.6 ทำการหล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ผสมเศษยิปซัมขนาด $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติสำหรับชิ้นทดสอบกำลังรับแรงอัด ขนาด $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ สำหรับชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ ขนาด $\text{Ø}69\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ สำหรับชิ้นทดสอบการนำความร้อน และขนาด $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 285\text{ mm}$ สำหรับชิ้นทดสอบการหดตัวแห้งและอัตราการขยายตัว

1.4.7 การประเมินผล

- ประเมินความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลเศษยิปซัมโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตมวลเบา

- ประเมินสัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้เศษยิปซัมแทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตมวลเบา

- ประเมินการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษยิปซัมในการแทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตทั่วไป

- ประเมินการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษยิปซัม

1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.9 สรุปผลการทดลอง

1.4.10 เผยแผ่งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำงาน

อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 4 5 6 และ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1.6.1 เครื่องมือสำหรับเตรียมวัสดุ

- เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200
- ชุดตะแกรงร่อน (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM E11
- เครื่องชั่งดิจิทัล

1.6.2 เครื่องมือสำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

- แบบหล่อมาตรฐาน
- เครื่องผสม (Mixer) แบบไม่ผสมเอียง
- เครื่องสร้างโฟม (Foam generator)
- เครื่องอัดอากาศ (Air compressor)

1.6.3 เครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติคอนกรีตมวลเบา

- เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Universal testing machines) รุ่น NRI-TS500-50 กำลังสูงสุด 50 กิโลนิวตัน
- เครื่องทดสอบการนำความร้อน
- เตาอบลมร้อน

1.6.4 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ระดับจุลภาค

- เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)
- กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope; OM)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของการรีไซเคิลยิปซัม

1.7.2 ทราบอัตราส่วนของยิปซัมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

1.7.3 เป็นแนวทางในการรีไซเคิลยิปซัม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยิปซัม

ยิปซัม (Gypsum) หรือ เกลือจืด คือ แคลเซียมซัลเฟตที่มีน้ำรวมอยู่ด้วย (Dihydrate) มีสูตรทางเคมี คือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ประกอบด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) 46.5% แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 32.6% และน้ำ (H_2O) 20.9% แต่ในเชิงพาณิชย์จะต้องมีไฮดรรัสแคลเซียมซัลเฟตประมาณ 95% คุณสมบัติทางกายภาพของยิปซัม มีความแข็ง 1.5-2.5 ความถ่วงจำเพาะ 2.35 ดัชนีหักเหของแสง 1.53 ยิปซัมมีหลายรูปแบบ แต่ที่พบโดยทั่วไปเป็นรูปแบบเฉพาะตัวที่รู้จักกันเรียกว่า ซิลิไนต์ (Selenite) เป็นยิปซัมที่มีลักษณะผลึกใส ส่วนยิปซัมที่มีลักษณะเป็นก้อนและมีหลายเรียกว่า อะลาบาสเตอร์ (Alabaster) และยิปซัมที่มีลักษณะเป็นเส้นใยเรียกว่า ซาตินสปาร์ (Satin spar) ยิปซัมในประเทศไทยมักเกิดร่วมกับแอนไฮไดรต์ มีแหล่งแร่อยู่ตามธรรมชาติในจังหวัดต่าง ๆ เช่น บริเวณเขตติดต่อของอำเภอหนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ กับอำเภอบางมูลนาก จังหวัดพิจิตร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช (ชยันต์ พิเชียรสุนทร และ วิเชียร จีรวงศ์, 2556)

ในระยะแรกยิปซัมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ยิปซัมจะถูกเติมลงไปปูนเม็ด (Clinker) ประมาณ 3-5% ของน้ำหนักปูน ก่อนจะนำไปบดและบรรจุถุง น้ำหนักของยิปซัมคือเป็นตัวหน่วง (Retarder) เพื่อชะลอการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ และทำให้ปูนจับตัวกับวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ เช่น กรวด ทราย ได้ดี มีกำลังอัดสูง ในภายหลังยิปซัมได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ เช่น แผ่นยิปซัมบอร์ด ปูนปลาสเตอร์ และคอนกรีตมวลเบา ซึ่งปัจจุบันการนำไปใช้เป็นวัสดุในอุตสาหกรรมก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยิปซัมยังถูกใช้ในการผลิตกำมะถัน แอมโมเนียซัลเฟต เป็นตัวเพิ่มออกซิเจน (Oxidizing agent) ในอุตสาหกรรมเครื่องแก้ว ใช้ในผลิตซอลล์ ดินสอสี และหัวไม้ขีดไฟ ยิปซัมที่มีความบริสุทธิ์สูง สามารถนำไปใช้ในการทำรูปแกะสลัก และใช้ในการตกแต่งภายใน ใช้ในงานด้านทันตกรรม ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเบียร์ โดยทำให้กระบวนการหมักเบียร์เป็นไปอย่างดีเลิศ และเบียร์ที่ได้มีความใส นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวปรับคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรม โดยการบดยิปซัมแล้วโปรยลงดินโดยตรง หรือนำไปผสมในน้ำที่ใช้รดแปลงเพาะปลูก แคลเซียมจากยิปซัมสามารถเข้าแทนที่อนุมูลของโซเดียมในดิน ทำให้ความเค็มลดลง สามารถนำกลับไปใช้เพาะปลูกได้อีกด้วย (มยุรี ปาลวงค์, 2552)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของฝ้ายิปซัมบอร์ดที่ใช้ในงานวิจัย (มอก. 219-2552)

ประเภทของแผ่นยิปซัม	คุณสมบัติ
ฝ้ายิปซัมบอร์ด (Gypsum Board)	น้ำหนักเบา เพียง 22 kg / m ² เบากว่าการก่ออิฐ 8-9 เท่า
	ป้องกันความร้อน และเสียง เป็นฉนวน มีค่านำความร้อนเพียง $K = 0.19 \text{ w/cm}^2$
	ไม่เป็นพิษและอันตรายต่อสุขภาพ
	ติดตั้งง่าย สะดวก ติดตั้งได้ 20 - 25 m ² / คน / วัน
	ตกแต่งง่าย สามารถทาสี ปิวอลเปเปอร์ ติดแผ่นกระเบื้องได้
	มีรูปแบบที่หลากหลาย เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น ชนิดธรรมดา ชนิดกันความร้อน ชนิดทนไฟ ชนิดทนความชื้น ชนิดที่มีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนได้ดีเช่น ชนิดอลูมิเนียมฟอยล์ ซึ่งเป็นการนำแผ่นยิปซัมมาด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ด้านหลังของแผ่นสามารถสะท้อนรังสีความร้อนได้ถึง 95% การนำความร้อนก็จะต่ำกว่าชนิดอื่น เหมาะสำหรับการทำฝ้าเพดานและ ผนังบริเวณที่ต้องการป้องกันความร้อนเป็นพิเศษ

2.2 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาโดยนิยามหมายถึง คอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งคอนกรีตธรรมดาที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 2240-2480 kg/m³ ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นระหว่าง 300-1680 kg/m³ (คำภี จิตรชัยภูมิ, 2556) คอนกรีตมวลเบาสามารถทำได้โดยการใส่หรือแทนที่วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงด้วยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำหรือมีความพรุนสูง หรือ การแทนที่เนื้อคอนกรีตบางส่วนด้วยฟองอากาศ คอนกรีตมวลเบาสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต ดังนี้

1) คอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด (No-fine aggregate concrete) เป็นคอนกรีตที่ไม่ใช้มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ในคอนกรีตมีแต่มวลรวมหยาบที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (Single size) คอนกรีตชนิดนี้มีการใช้ปริมาณซีเมนต์และน้ำที่ต่ำ ดังนั้นช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่างมวลรวมหยาบจึงมีจำนวนมาก คอนกรีตประเภทนี้เรียกว่าคอนกรีตพรุน (Porous concrete)

2) คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete) เป็นคอนกรีตมวลเบาที่ใช้มวลรวมพรุนที่มีน้ำหนักเบา โดยค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมพรุนมีค่าต่ำกว่ามวลรวมปกติ

3) คอนกรีตมวลเบาที่เกิดจากการเติมฟองอากาศ (Aerated concrete) เป็นคอนกรีตที่ทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง (Void) ขนาดใหญ่ภายในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ โพรงอากาศเหล่านี้จะมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอและหนาแน่นเป็นพิเศษโดยการกักกระจายของอากาศ (Air entrainment) คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น คอนกรีตอัดอากาศ (Aerated concrete) โฟมคอนกรีต (Foamed concrete) ก๊าซคอนกรีต (Gas concrete) หรือคอนกรีตเซลลูล่า (Cellular concrete) เป็นต้น

สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูลาร์ที่ได้โดยการเพิ่มฟองอากาศขนาดตั้งแต่ 0.1-5 mm เข้าไปในเนื้อซีเมนต์เพสต์ซึ่งจะมีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1,001-1,200 และ 1,201-1400 kg/m³ กำลังรับแรงอัดก่อนข้างต่ำตั้งแต่ 0.3-0.7 MPa แต่มีคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิต่ำ โดยมีความสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตั้งแต่ 0.1-0.3 W/m.K คอนกรีตมวลเบาจากการกักฟองอากาศได้รับความนิยมอย่างสูงในแถบยุโรป ต่อมาได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างของประเทศไทยในรูปแบบของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์แตกต่างจากคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตโดยใช้วัสดุมวลรวมที่มีน้ำหนักเบา โดยในกระบวนการผลิตจะมีการใส่หรือเติมฟองอากาศปริมาณสูงเข้าไปในเนื้อซีเมนต์ จากนั้นปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัว คอนกรีตที่ได้จะมีปริมาณฟองอากาศปริมาณสูงกระจายอยู่ทั่วไป และมีมวลหรือหน่วยน้ำหนักเบาตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามต้องทำความเข้าใจตรงนี้ก่อนว่าคำว่าคอนกรีตเซลลูลาร์นั้นในกระบวนการผลิตจริงนั้นไม่มีการใส่มวลรวมหยาบเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เพราะฉะนั้นคอนกรีตที่ได้จึงเป็นเพียงซีเมนต์มอร์ตาร์ (Mortar) ที่มีองค์ประกอบหลักคือซีเมนต์และทราย การใช้คำว่าคอนกรีตในคอนกรีตมวลเบาประเภทเซลลูลาร์ เป็นการใช้กันมาตั้งแต่เริ่มต้นและก็ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงแก้ไข ส่วนใหญ่จึงยังนิยมใช้คำว่าคอนกรีตเซลลูลาร์กันเรื่อยมาโดยคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูลาร์ สามารถแบ่งได้ตามลักษณะของการผลิตฟองอากาศออกเป็น 2 แบบคือ

1. กระบวนการผลิตด้วยฟองก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาเคมีของอลูมิเนียมออกไซด์
2. กระบวนการผลิตฟองอากาศโดยใช้สารกักฟองอากาศปริมาณสูง

ตารางที่ 2.2 ชนิดของคอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน มอก. 2601

ชนิด	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ต้านแรงอัด (MPa)	ดูดซึมน้ำ (%)
C9	801-900		
C10	901-1000	2.5	23.0
C12	1001-1200		
C14	1201-1400	5.0	20.0

2.3 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูล่า

2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Type-I portland cement :OPC) ปูนประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงจึงเป็นที่นิยมใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป เหมาะที่จะนำไปใช้กับงาน โครงสร้างอาคาร เช่น ฐานรากของอาคาร เสา คาน ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว และตราทีพีไอสีเขียว เป็นต้น

2.3.1.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (สราวุธ เจริญศิริเสถียร, 2552)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารประกอบหลัก 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1) สารประกอบหลัก ได้แก่

- ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S) คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 – 3 ชม. และพัฒนากำลังอัดในช่วงสัปดาห์แรก มีอยู่ในปูนร้อยละ 35 – 55
- ไดแคลเซียมซิลิเกต เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีการพัฒนากำลังในระยะยาว มีอยู่ในปูนร้อยละ 15 – 35
- ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C₃A) จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที กำลังรับแรงอัดจะพัฒนาขึ้นภายใน 1 – 2 วัน มีอยู่ในปูนร้อยละ 7 – 15
- เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C₄AF) จะทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วก่อตัวภายในไม่กี่นาที มีอยู่ในปูนร้อยละ 5 – 10

2) สารประกอบรอง

- ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ในการผลิตปูนจะถูกบดรวมกับยิปซัม เพื่อป้องกันการก่อตัวที่เร็วจนเกินไป ในทางกลับกันจะต้องมีปริมาณของยิปซัมที่มีมากจะเกินไป เพราะจะทำให้ซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการแตกร้าว เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนต

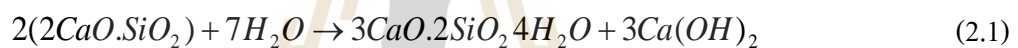
กับยิปซัมทำให้เกิดเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) เมื่อยิปซัมผสมอยู่ในปริมาณที่มาก ปฏิกริยาจะเกิดต่อเนื่องไปหลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว หลังอาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้

- ปูนขาวอิสระ (CaO) เมื่อรวมตัวกับน้ำหลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ผลที่ได้ คือ ปริมาตรเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปูนขาวอิสระมีมากอาจทำให้ ซีเมนต์ที่ก่อตัวแล้วแตกร้าวได้
- แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกันกับ CaO คือ มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว
- ออกไซด์ของอัลคาไลด์ (K_2O และ Na_2O) จะมีในวัสดุผสม (Aggregate) สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลด์ เรียกปฏิกิริยาว่า “ปฏิกิริยาอัลคาไลด์มวลรวม” ซึ่งจะก่อให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

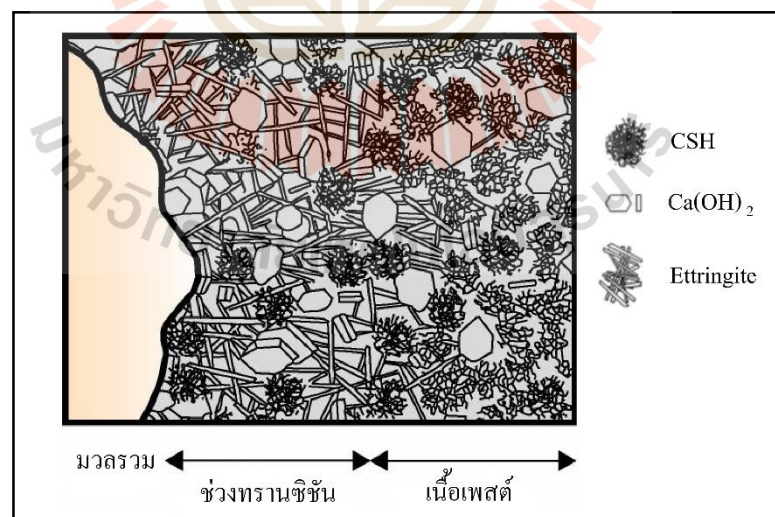
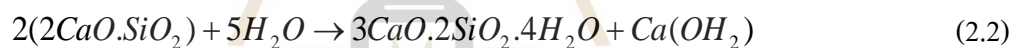
2.3.1.2 ปฏิกิริยาของสารประกอบ

- 1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.1

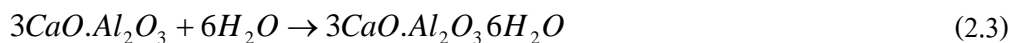


และ

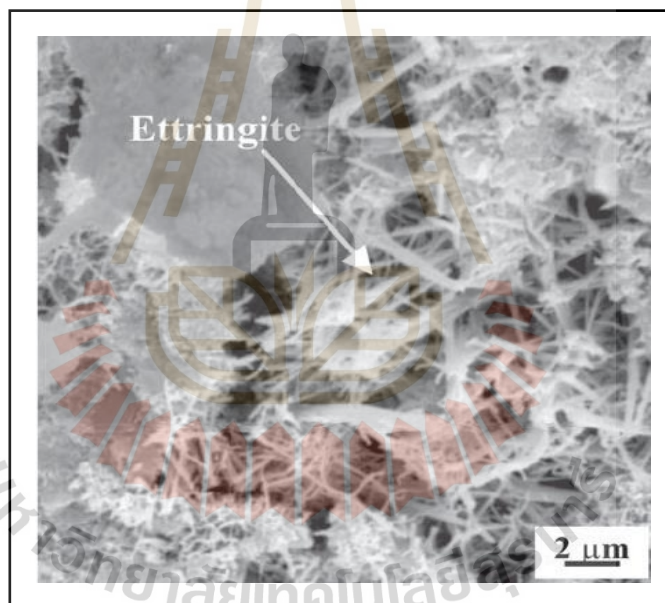
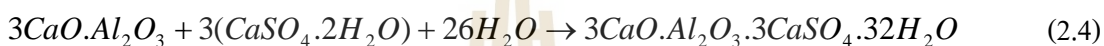


รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตและยิปซัม (สราวุธ เจริญศิริเสถียร, 2552)
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์ ดังสมการ 2.3



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างขบวนการบดปูนเม็ดยิปซัมจะเข้าไปทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดขึ้นของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ในรูปที่ 2.2 ดังสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) มีลักษณะคล้ายเข็มผลึก

2.3.2 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียด (Fine aggregates) หมายถึง มวลที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 mm เป็นมวลที่สามารถรูดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่มีขนาดใหญ่กว่า 0.0074 mm การผสมมวลละเอียดลงในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ใช้กันทั่วไปเป็นวัสดุที่หาได้จากธรรมชาติ เช่น ทรายทะเล หรือ ทรายบก ดังนั้น คุณสมบัติของมวลรวมจึงมีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตโดยตรง

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุผสมที่ต้องคำนึง ได้แก่ ความแข็งแรง รูปร่างและผิว ความสะอาด ขนาดละเอียด เป็นต้น

2.3.3 น้ำ

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญในการทำคอนกรีตที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์แล้ว น้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตต้องเป็นน้ำสะอาด ไม่นิยมใช้น้ำทะเลเนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือโครไรด์ซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักใช้น้ำประปาและน้ำจืดตามธรรมชาติที่ไม่มีส่วนผสมของน้ำเสีย สารเน่าเปื่อยปฏิจุลหรือตะไคร่น้ำถือว่ามียุทธภาพดีพอสำหรับใช้ในงานคอนกรีต หากน้ำไม่สะอาดมีตะกอน สารละลายอนินทรีย์ และสารละลายอินทรีย์ เจือปนอยู่มาก อาจก่อปัญหาด้านระยะเวลาก่อตัว การหดตัวของคอนกรีต การมีรอยคราบเกลือ (Efflorescence) อยู่ที่ผิวของคอนกรีต และอาจส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตที่ต่ำลง ตลอดจนความคงทนของคอนกรีตลดลง (สุพพัต บัณฑูทธิ, 2559)

2.3.4 สารเพิ่มฟอง

สารเพิ่มฟอง (Foaming agent) คือ สารที่ทำให้เกิดฟองอากาศจัดเป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) ชนิดหนึ่ง เมื่อนำมาผสมกับน้ำจะทำให้เกิดฟองอากาศคล้ายสบู่ ฟองซักฟอก แต่ขนาดเล็กกว่าและมีเสถียรภาพมากกว่า ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กรวมตัวกันคล้ายเนื้อครีม หรือ ฟองโฟม ฟองอากาศจะมีการแตกตัวเล็กน้อยเมื่อผสมกับคอนกรีต สารที่ใช้เพิ่มฟองอากาศมีอยู่หลายชนิด ส่วนมากเป็นสารประกอบจำพวกกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) หรือกรดซัลโฟนิค (Sulfonic acids) ผสมกับไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) นอกจากนี้อาจเป็นสารจำพวกเกลือเรซินของไม้ (Salt of wood resin), ดีเทอเจนสังเคราะห์ (Synthetic detergents), เกลือของซัลโฟเนตลิกนิน (Salts of sulfonated lignin), เกลือของกรดปิโตรเลียม (Salt of petroleum acids) และไขมันบางชนิด เป็นต้น ปัจจุบันสารเพิ่มฟองส่วนใหญ่ได้มาจากอุตสาหกรรมกระดาษ ปิโตรเคมี และผลิตภัณฑ์จากสัตว์ การใช้งานสารเพิ่มฟองจะนำมาผสมกับน้ำเพื่อลดความเข้มข้นของปริมาณสารและลดแรงตึงผิวของน้ำ ดังนั้นปริมาณสารที่ใช้จึงมีค่าน้อยประมาณร้อยละ 0.005-0.05 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ (เฉลิมชัย ไชยรงค์, 2559)

2.4 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2007 Xiao Lu Guo และ Hui Sheng Shi ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของยิปซัมและส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา โดยขบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกมาพร้อมก๊าซทิ้ง (FGD) และมีการสำรวจยิปซัมที่เป็นส่วนผสมในซีเมนต์และคอนกรีต โดยในการทดลองได้นำ

ยิปซัมไปอบ ซึ่งยิปซัมได้รับการอบที่อุณหภูมิที่ผ่านการปรับตั้งอุณหภูมิที่ 30 200 และ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการอบคือ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีแล้วนำมาผสมเป็นผงตะกันและใช้ในการขึ้นรูป และยิปซัมที่ใช้ในงานวิจัยจะถูกควบคุมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_3) ที่มีอยู่ในยิปซัมให้อยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ 3.5% ของน้ำหนักปูน ผลการศึกษาพบว่ายิปซัมช่วยชะลอการหดตัวและเพิ่มความแข็งแรงของซีเมนต์ นอกจากนี้การปรับตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังแสดงถึงข้อดีเมื่อถูกผสมรวมกับเมลามีนและแนฟทาลี

ต่อมาในปี ค.ศ. 2010 Mridul Garg และ Neeraj jain ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับของเสียยิปซัมจากอุตสาหกรรมระหว่างการย้อมสีสำหรับการผลิตวัสดุก่อสร้าง การใช้ประโยชน์จากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและการใช้ประโยชน์ของยิปซัมเคมี วัสดุของเสียที่ผลิตอยู่ระหว่างกลางของกรดซัลฟูริกในระหว่างการก่อตัวของสีย้อม ยิปซัมของเสียที่ใช้มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์เช่นสารประกอบไนโตร, สารแนฟทาลี ฯลฯ การกำจัดสิ่งสกปรกและการปรับปรุงลักษณะได้ดำเนินการโดยการล้างด้วยน้ำ การปั่นแห้ง และการอบแห้ง กระบวนการปรับปรุงคุณภาพยิปซัมเคมีโดยการเผาในรูปแบบปูนพลาสติก B-hemihydrate ปูนพลาสติกจะได้รับการทดสอบและประเมินผลด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรมเช่นแรงอัดความหนาแน่นการดูดซึมน้ำและความพรุน คุณสมบัติเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพยิปซัมเคมีสำหรับอุตสาหกรรมการทำอาคารและชนิดก่อนปูนพลาสติก จากการหล่อบล็อก, กระจกและวัสดุประสาน ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ (9.5%) และกำลังรับแรงอัดที่ 19.6 MPa ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งสามารถนำมาผลิตเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างจากการใช้งานของเสียยิปซัม ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาอย่างยั่งยืน

ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 Gustavo Tovar-Rodríguez และคณะ ได้ศึกษาการขยายตัวของปูนกับมวลรีไซเคิลยิปซัม โดยศึกษาครั้งนี้ประเมินการขยายตัวของมวลรีไซเคิลรวมในปูนที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ปูนซีเมนต์ปกติและปูนซีเมนต์ที่มีสารด้านซัลเฟต (SO_3) เนื้อหาการทดลองแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ ในระยะแรก มีการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนผสมและชนิดของปูนที่เหมาะสม โดยมีการผลิตและทดสอบด้วยวิธีการใช้รังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์สารไฮเดรตที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ในระยะที่สองตัวอย่างปูนถูกนำมาเพื่อประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลโดยวัดการขยายตัวในแต่ละช่วงเวลา ผลการศึกษาพบว่าการรวมตัวกันของปูนปนเปื้อนมวลรีไซเคิลยิปซัมที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ขยายได้ถึง 2.9% โดยน้ำหนัก ไม่คำนึงถึงประเภทปูนซีเมนต์ที่ศึกษาส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อความทนทานของปูนซึ่งในการศึกษานี้สอดคล้องกับสารปนเปื้อนที่แสดงอยู่ในคุณสมบัติของยิปซัม

ในปีเดียวกัน (2012) M.J. Gazquez และคณะ ได้ศึกษาการประเมินผลการใช้งาน TiO_2 ของอุตสาหกรรมของเสียยิปซัมสีแดงในการผลิตปูนซีเมนต์ งานนี้วิเคราะห์และประเมินคุณสมบัติทางกล ความยืดหยุ่นและอุณหภูมิศาสตร์หลักของซีเมนต์ที่ผลิตด้วยสัดส่วนที่แตกต่างกันของยิปซัมสีแดง (RG) ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมไทเทเนียม ไดออกไซด์ ผลปรากฏว่ายิปซัมสีแดงสามารถใช้เป็นส่วนทดแทนที่ปลอดภัยสำหรับยิปซัม ในการผลิตซีเมนต์ในเชิงพาณิชย์ที่มีการลดลงของคุณภาพ นอกจากนี้การชะล้างสารมลพิษที่เป็นต้นเหตุในยิปซัมสีแดงมีเพียงเล็กน้อยที่อยู่ในซีเมนต์ที่ทำจากของเสียยิปซัมนี้ ทดสอบปริมาณของสารมลพิษและชะล้างด้วยมาตรฐานซีเมนต์ที่ผสมกับยิปซัมธรรมชาติ

ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 Philip Zak และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยเสริมแรงธรรมชาติ ยิปซัมและปูนซีเมนต์กับแรงอัดของวัสดุอิฐก้อนดิน บทความนี้นำเสนอผลงานการทดลองเกี่ยวกับแรงอัดของอิฐก้อนดิน โดยเฉพาะอิทธิพลของสารเติมแต่ง ทั้งหมด 21 ชุดทดสอบที่แตกต่างกัน โดยการผสมองค์ประกอบที่แตกต่างกันของดิน ปูน ยิปซัม เส้นใยป่านและปอ การทดสอบก่อนอิฐเป็นลักษณะการทดสอบในห้องปฏิบัติการธรณี ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงอัดสูงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิฐ ส่วนเส้นใยป่านและปอมีผลกระทบค่อนข้างต่ำต่อแรงอัดของก้อนอิฐ แต่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการทำลาย ปูนซีเมนต์และยิปซัมเป็นสารเติมแต่งที่ดูเหมือนจะลดแรงที่มีผลกับแรงดินเหนียวซึ่งนำไปสู่การลดลงของความแข็งแรงอย่างมาก

ในปีต่อมา (2016) Mehmet Gesoglu และคณะ ทำการศึกษาผลกระทบของมวลรวมที่มียิปซัมสูงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงสูงพิเศษในคอนกรีตและปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ซึ่งวัสดุซีเมนต์ที่มีความแข็งแรงมีความต้องการที่เพิ่มขึ้นในตะวันออกกลาง การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของยิปซัมที่เพิ่มขึ้นแทนทรายแม่น้ำ โดยใช้คุณสมบัติการบ่มด้วยการแช่น้ำและอบไอน้ำเพื่อรักษาความแข็งแรงสูงพิเศษของคอนกรีต (UHSCs) และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ คอนกรีตและปูนทั้งหมดได้จัดให้มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.197 และ 0.440 ตามลำดับ บ่มเป็นเวลา 28 วัน ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของการแช่น้ำและการอบไอน้ำคือ 120-142 และ 43-70 MPa ตามลำดับ ทำการทดลองการขยายตัว, แรงอัดและแรงดึง, และผลการยิง X-ray ที่อายุแตกต่างกัน USHC และปูนแสดงแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการต่อต้านของซัลเฟตภายใน ขณะที่ UHSCs ไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญในการเพิ่มยิปซัมแทนทรายในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ความสึกหรอเห็นจากการลดลงของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญและการเกิดของเอ็ททริงไคต์ที่เพิ่มขึ้น

2.5 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นการนำของยิปซัมมารีไซเคิลด้วยการใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีต พบว่าจะใช้ในการแทนที่ทรายบางส่วนซึ่งปริมาณการแทนที่ทรายด้วยยิปซัมจะมีปริมาณการแทนที่ไม่เกิน 50 % นิยมทดสอบคุณสมบัติเชิงกล คือ กำลังรับแรงอัด และทดสอบการขยายตัวเพียงเล็กน้อย รวมถึงการเกิดของผลึกเอ็ททริงไกต์ ที่อาจส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเพิ่มเติมในเพิ่มปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมและการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล คือ กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน การหดตัวแห้ง การขยายตัวของคอนกรีต และการเกิดผลึกเอ็ททริงไกต์



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

ในส่วนของบทนี้จะอธิบายรายละเอียดวิธีการดำเนินงาน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำยิปซัมกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่อาจมีผลต่อคุณสมบัติอื่นๆ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ ประสิทธิภาพการนำความร้อน การหดตัวแห้ง และอัตราการขยายตัวของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต รายละเอียดของวิธีการดำเนินงานประกอบด้วย วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ การทดสอบสมบัติของวัสดุ การวิเคราะห์ระดับจุลภาค การขึ้นรูปและการทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ พร้อมแผนภาพการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุ

3.2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง (Type I - portland cement หรือ OPE) ตามมาตรฐาน (ASTM C150) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมีสีเทา ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 7.05 ไมโครเมตร และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง

3.2.2 ททราย

ทรายที่ใช้ในงานวิจัยเป็นทรายแม่น้ำ (River sand) ที่ถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนมนสีน้ำตาล โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.97 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.35 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.33 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ทรายที่ผ่านกระบวนการร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐาน

3.2.3 เศษยิปซัม

ในงานวิจัยนี้ใช้เศษยิปซัมจากกระบวนการผลิตยิปซัมบอร์ด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ที่ได้จากการตัดขอบของแผ่นยิปซัมบอร์ด จากบริษัท คณิตโฟท์ จำกัด เศษยิปซัมมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมีสีขาว ซึ่งมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.15 - 2.91 โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.85 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.35 และ ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.72

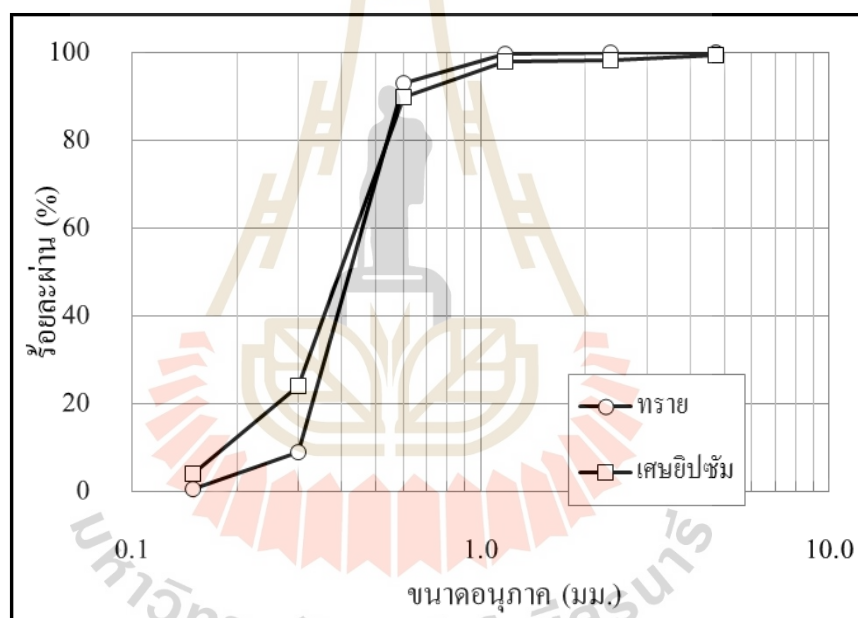


รูปที่ 3.3 เศษยิปซัมบอร์ด

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด

วัสดุ	รูปร่าง/สี	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย/ โมดูลัสความละเอียด**	ความ ถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์	เหลี่ยมมุม/สีเทา	7.05 ไมครอน	3.15*	N/A
ทราย	กึ่งมนกึ่งเหลี่ยม/ สีน้ำตาล	1.97**	1.35	0.33
เศษเม็ดชิปซั่ม	เหลี่ยมมุม/สีขาว	2.85**	1.35	0.72

หมายเหตุ : *ข้อมูลอ้างอิงจากผู้ผลิต, **โมดูลัสความละเอียด เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความละเอียดของมวลรวม



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดส่วนคละของทรายและเศษชิปซั่ม

3.2.4 น้ำ

น้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ น้ำประปาสะอาด มีค่า pH อยู่ที่ 7.5-8 ปราศจากสารปนเปื้อนที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต

3.2.5 สารเพิ่มฟอง

ในงานวิจัยนี้ใช้สารเพิ่มฟอง (Foaming agent) ชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตรสารเพิ่มฟองเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ SUT สูตร 1 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ และคณะ, 2554

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.3.1 เครื่องร่อนแยกขนาด

เครื่องร่อนแยกขนาดที่ใช้ในงานวิจัยคือเครื่องร่อน (Sieve Shaker) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200 พร้อมชุดตะแกรงร่อน (Sieve) มาตรฐาน ASTM E11 เพื่อใช้ในการร่อนแยกเศษกระดาษที่เจือปนอยู่ในยิปซัมก่อนนำไปเป็นส่วนผสมในคอนกรีตมวลเบาดังรูปที่ 3.5 โดยตะแกรงร่อนแต่ละเบอร์จะมีขนาด ดังนี้

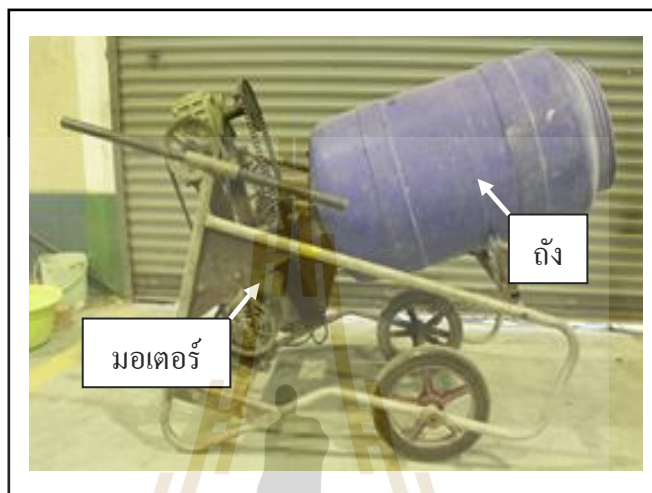
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 4 ขนาดช่องว่าง 4.75 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 8 ขนาดช่องว่าง 2.36 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ขนาดช่องว่าง 1.18 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 30 ขนาดช่องว่าง 0.60 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 40 ขนาดช่องว่าง 0.42 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 50 ขนาดช่องว่าง 0.30 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 100 ขนาดช่องว่าง 0.15 mm



รูปที่ 3.5 เครื่องร่อนแยกขนาด

3.3.2 เครื่องผสม

เครื่องผสม (Mixer) ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเครื่องผสมแบบ โม่ผสมเอียง (Tilting drum mixer) ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานดังรูปที่ 3.6 ซึ่งตัวโม่ทำขึ้นจากถังพลาสติกบรรจุสารเคมีและขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (เฉลิมชัย ไชยณรงค์, 2559)



รูปที่ 3.6 เครื่องผสมแบบ โม่ผสมเอียง

3.3.3 เครื่องอัดอากาศและเครื่องสร้างโฟม

เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ดังรูปที่ 3.7 จะถูกใช้คู่กับเครื่องสร้างโฟม (Foam generator) ดังรูปที่ 3.8 ชนิดถังอัดอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยเครื่องอัดอากาศจะทำหน้าที่อัดอากาศเข้าไปในถังเครื่องสร้างโฟม ซึ่งสามารถตั้งความดันอยู่ในช่วง 2 - 6 bar ในงานวิจัยจะตั้งความดันไว้ที่ 4.5 bar โดยในการใส่สารก่อโฟมในเครื่องสร้างโฟมจะต้องทำการเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน 1:40 โดยน้ำหนัก



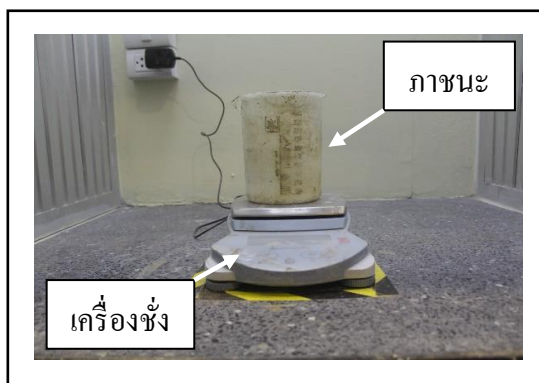
รูปที่ 3.7 เครื่องอัดอากาศ



รูปที่ 3.8 เครื่องสร้างโฟม

3.3.4 ภาชนะและเครื่องชั่งคอนกรีตสด

ในงานวิจัยนี้จะหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีตสดโดยการชั่งน้ำหนัก โดยการนำคอนกรีตสดใส่ลงในภาชนะ (Container) ที่มีปริมาตร 1 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จากนั้นชั่งน้ำหนักคำนวณหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีตสด คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของคอนกรีตสดต่อปริมาตรของภาชนะ มีหน่วยเป็น kg/m^3

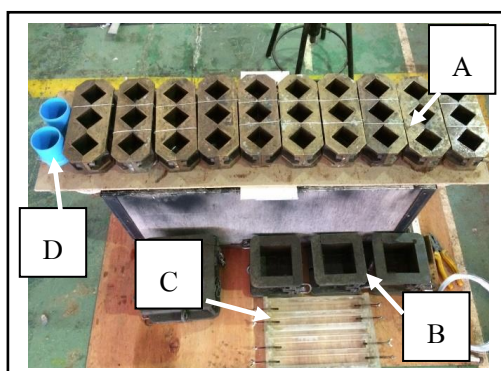


รูปที่ 3.9 ภาชนะและเครื่องชั่งคอนกรีตสด

3.3.5 แบบหล่อมาตรฐาน

แบบหล่อคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ใช้ในงานวิจัยใช้แบบหล่อตามมาตรฐาน BS 1881 ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบไปด้วย

- A. แบบหล่อมาตรฐานขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ สำหรับหล่อชิ้นทดสอบกำลังรับแรงอัด
- B. แบบหล่อมาตรฐานขนาด $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ สำหรับหล่อชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ
- C. แบบหล่อมาตรฐานขนาด $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$ สำหรับหล่อชิ้นทดสอบการหดตัวแห้งและอัตราการขยายตัว
- D. ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 mm สูง 75 mm สำหรับหล่อชิ้นทดสอบการนำความร้อน



รูปที่ 3.10 แบบหล่อมาตรฐาน

3.3.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

งานวิจัยนี้การทดสอบกำลังรับแรงอัด ใช้เครื่องทดสอบรุ่น NRI-TS500-50 ภาระที่รับได้สูงสุด 50 kN ทดสอบ โดยให้แรงกดที่ผิวด้านหน้าในทิศตั้งฉากกับแนวแรง ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.3.7 เครื่องทดสอบการนำความร้อน

เครื่องทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา ดังรูปที่ 3.12 ทำการทดสอบ โดยการให้ความร้อนที่ผิวหน้าด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ ส่วนผิวหน้าอีกด้านรักษาอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งถูกหล่อเย็นโดยใช้น้ำ ในขณะที่ทดสอบทำการวัดค่าอุณหภูมิและค่าพลังงานความร้อน (Heat) ที่มีหน่วยเป็น วัตต์ (W) จากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้า และนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ที่มีหน่วยเป็น W/m.K โดยเครื่องทดสอบการนำความร้อนได้รับความอนุเคราะห์จาก ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ และคณะ



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบการนำความร้อน

3.3.8 ตู้อบลมร้อน

ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น BE-200 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 สามารถตั้งอุณหภูมิและเวลาสำหรับอบขึ้นทดสอบ เพื่อใช้ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 3.13 ตู้อบลมร้อน

3.3.9 เครื่องวัดขนาด

เครื่องวัดขนาดคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นรุ่น HM-250D ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อใช้ในการวัดค่าการหดตัวและอัตราการขยายตัวของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดขนาดคอนกรีต

3.4 วิธีการทดสอบสมบัติวัสดุ

3.4.1 การออกแบบส่วนผสม

ในงานวิจัยนี้ใช้ปริมณฑลที่ทรายในปริมาณร้อยละ 5 15 30 50 70 และ 100 โดยน้ำหนักซีเมนต์ คงที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ทุกส่วนผสมเท่ากับ 0.7 ควบคุมน้ำหนักคอนกรีตสดทุกส่วนผสมที่ 1,100 และ 1,300 kg/m³ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

3.4.2 การเตรียมฟอม

ในการศึกษาครั้งนี้คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตมวลเบา (CLC) โดยควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 และ 1,300 kg/m³ โดยใช้สารเพิ่มฟองในการสร้างฟองอากาศ โดยนำสารเพิ่มฟองไปเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน สารเพิ่มฟองต่อน้ำ เป็น 1:40 แล้วนำไปเทใน

เครื่องสร้างโฟมที่ต่อกับเครื่องอัดอากาศและอัดความดันให้อยู่ที่ 4.5 bar เพื่อให้โฟมมีขนาดเล็กประมาณ 0.1 – 1 mm

3.4.3 การหล่อตัวอย่าง

ในการหล่อตัวอย่างจะทำการเทคอนกรีตสดลงในแบบหล่อมาตรฐานขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ แบบหล่อมาตรฐานขนาด $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ แบบหล่อมาตรฐานขนาด $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$ และท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 mm สูง 75 mm ภายหลังผสมคอนกรีตเสร็จและใช้แท่งกระทุ้ง 40 ครั้ง เพื่อให้คอนกรีตไหลเข้าแบบหล่อทั่วถึงกัน ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงทำการปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 คอนกรีตสดที่ถูกเทลงในแบบหล่อ

3.4.4 การถอดแบบและการบ่ม

หลังจากเทคอนกรีตประมาณ 24 ชั่วโมง จะทำการถอดแบบแล้วทำการบ่มโดยนำก้อนคอนกรีตตัวอย่างห่อปิดด้วยแผ่นพลาสติกใสและเก็บใส่ถุงปิดผนึกถุงให้เรียบร้อยเพื่อไม่ให้อากาศเข้าเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบ 28 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างมาทดสอบสมบัติเชิงกล

3.4.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ในงานวิจัยนี้การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength test) ของคอนกรีตมวลเบาจะใช้ตัวอย่างขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ โดยการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมในปริมาณร้อยละ 5 15 30 50 70 และ 100 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ คงที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

(w/c) เท่ากับ 0.7 ควบคุมความหนาแน่นคอนกรีตสดอยู่ที่ 1,100 และ 1,300 kg/m³ ทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้ระยะบ่ม 4 ช่วง ได้แก่ 7, 14, 28, และ 60 วัน ตามมาตรฐาน (ASTM C 109-13)

3.4.6 การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุทดสอบ ดังสมการที่ (3.1) ตามมาตรฐาน ASTM C128 ในงานวิจัยนี้ ใช้ค่าความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity) โดยคิดที่วัสดุอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry; SSD)

$$S_g = \left(\frac{B}{B-C} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ S_g = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ
 B = น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ (g)
 C = น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวชั่งในน้ำ (g)

3.4.7 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ

การดูดซึมน้ำ (Water absorption; WA) เป็นสมบัติของวัสดุที่สามารถดูดซึมน้ำไว้ การหาค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตให้อยู่ในความชื้นเหลือที่พอเหมาะ ซึ่งคำนวณได้จากผลต่างของความชื้นในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งกับสภาพที่แห้งตามมาตรฐาน (ASTM C128) ดังสมการที่ (3.2)

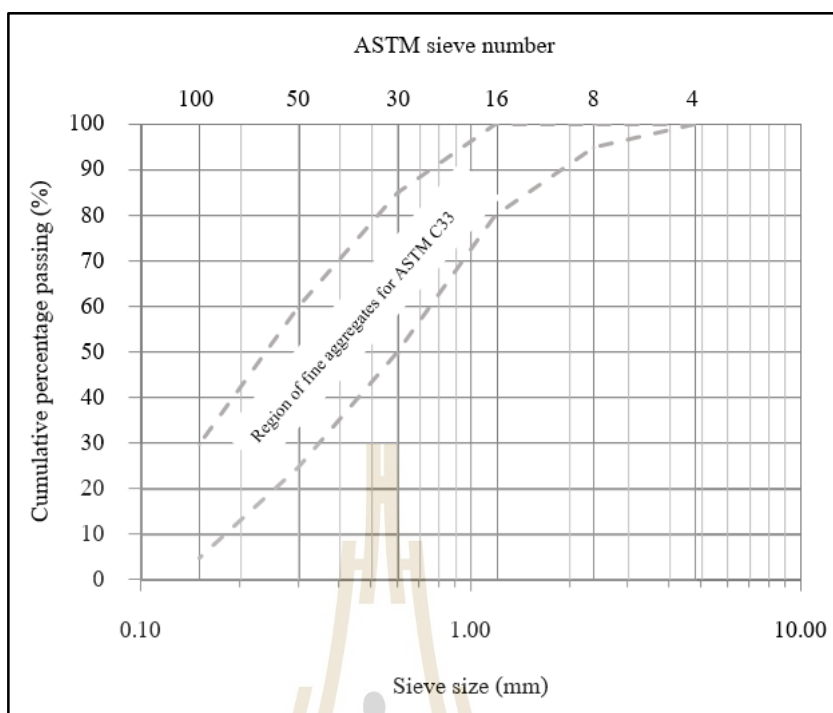
$$W_a = \left(\frac{B-A}{A} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ W_a = การดูดซึมน้ำ (%)
 B = น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ (g)
 A = น้ำหนักของวัสดุแห้งชั่งในอากาศ (g)

3.4.8 การวิเคราะห์ขนาดคละ

โดยทั่วไปชนิดของมวลที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของคอนกรีต ความทนทาน และกำลังของคอนกรีตเมื่อแข็งตัว ขนาดของมวลที่ใช้ในการผสมจะทำให้สามารถทราบคุณภาพคอนกรีตได้ตามที่ต้องการ โดยปกติมวลรวมที่หาได้ตามธรรมชาติอาจจะมีขนาดคละที่ไม่ดีนัก ฉะนั้นจึงต้องนำมวลรวมที่มีอยู่มาทำการวิเคราะห์ และหาเปอร์เซ็นต์ส่วนคละเพื่อให้ได้มวลรวมที่มีขนาดคละที่เหมาะสม โดยมวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ถูกจำแนกตามขนาดด้วยตะแกรงเบอร์ 4 คือ มวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องเปิดของตะแกรงเบอร์ 4 จัดเป็นมวลรวมหยาบ และมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงเบอร์ 4 จัดเป็นมวลรวมละเอียด การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวม สามารถทำได้ด้วยการร่อนมวลรวมตัวอย่างในปริมาณที่ทราบค่า ผ่านตะแกรงมาตรฐานที่เรียงซ้อนกันตามขนาดของตะแกรง โดยให้ตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่สุดอยู่ด้านบนและขนาดเล็กสุดอยู่ด้านล่าง สำหรับการวิเคราะห์ขนาดคละมวลรวมละเอียดจะใช้ตะแกรง เบอร์ 4 8 16 30 50 และ 100 ตามมาตรฐาน (ASTM C33) ซึ่งผลการวิเคราะห์ขนาดคละมักแสดงเป็น ร้อยละของน้ำหนักผ่าน สะสม (Cumulative percentage passing) แสดงดังรูปที่ 3.16 เมื่อคำนวณร้อยละของน้ำหนักค้างสะสม (Cumulative percentage retained) บนตะแกรงมาตรฐานหารด้วยหนึ่งร้อย จะได้ค่าที่เรียกว่า โมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus)





รูปที่ 3.16 แผนภาพแสดงขนาดคละของมวลรวม (ASTM C33)

3.5 การวิเคราะห์ระดับจุลภาค

การวิเคราะห์ระดับจุลภาคทำให้สามารถเข้าใจสมบัติต่างๆ ของวัสดุ ทั้งทางกายภาพและทางเคมี เนื่องจากสมบัติของวัสดุมีผลต่อการใช้งานของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

3.5.1 กล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopes; OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscopes) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็กในการศึกษาลักษณะ โครงสร้างของวัตถุ โดยใช้คลื่นแสงที่มนุษย์มองเห็น ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 μm จะทำได้ภาพที่มีความคมชัดมากยิ่งขึ้น กล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงดังรูปที่

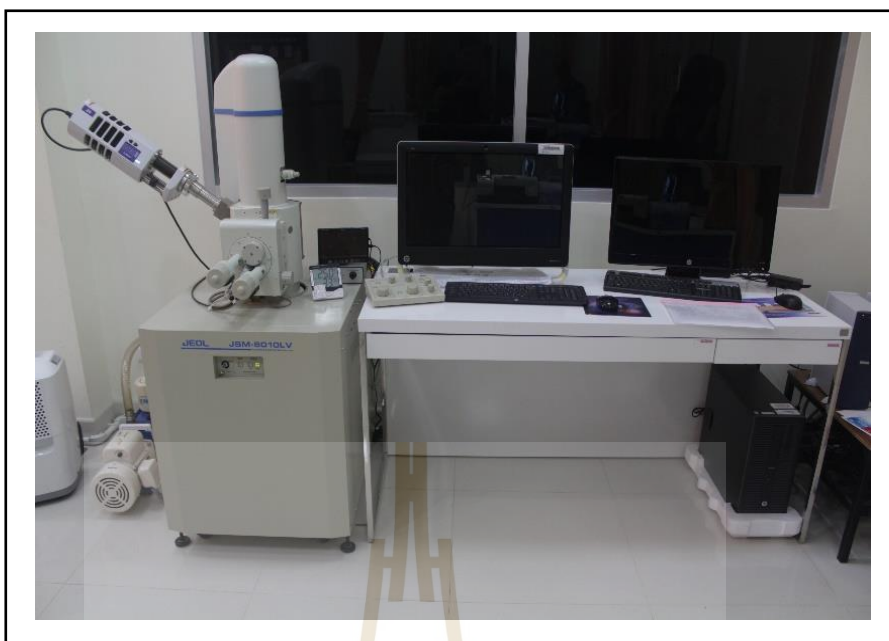
3.17



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

3.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค โดย SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่มีกำลังขยายสูง โดยใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสง ทำให้ SEM มีความสามารถในการแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง $0.2 \mu\text{m}$ ส่องกราดไปบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบในการสร้างภาพในแนวระนาบและแนวลึก โดยมีกำลังขยายอยู่ในช่วง 10-500,000 เท่า ซึ่งในงานวิจัยนี้ ก้อนคอนกรีตตัวอย่างจะถูกนำมาถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงเพื่อที่จะนำภาพถ่ายขยายของอนุภาค (Scanning electron microscopy) มาวิเคราะห์ ในการเตรียมตัวอย่างจะทำโดยการนำก้อนคอนกรีตตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทุบก้อนคอนกรีตตัวอย่างให้มีขนาดเล็ก ที่ขนาดไม่เกิน กว้าง x ยาว ประมาณ $5 \times 5 \text{ mm}$ ความหนาไม่เกิน 5 mm จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบผิวด้วยทองคำและนำไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM ยี่ห้อ JSM รุ่น 6010 LA ดังแสดงในรูปที่ 3.18



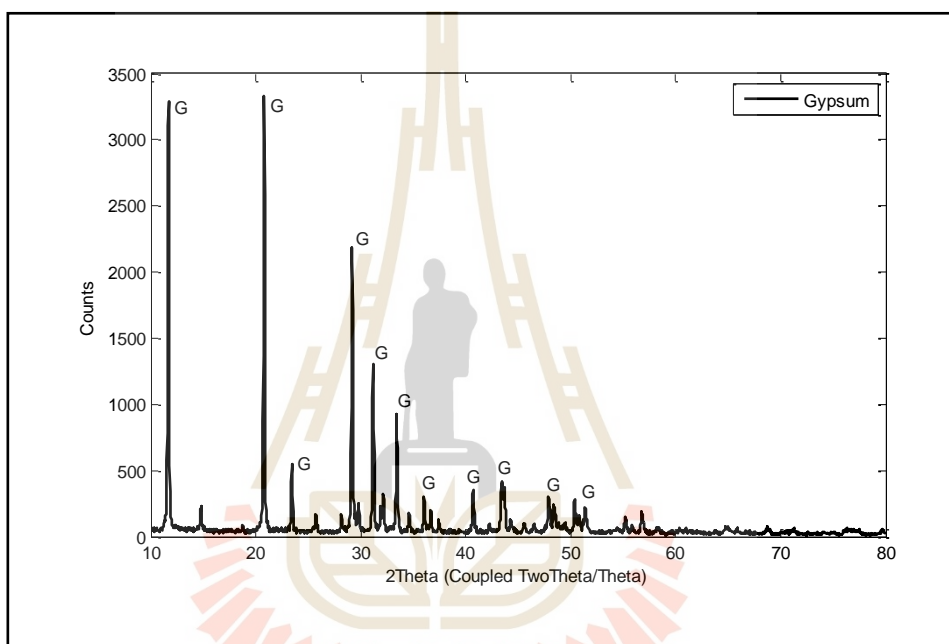
รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.5.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นผลึกเพื่อหาสารประกอบของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอกซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึก และจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg ดังแสดงสมการที่ (3.3) เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน เราจึงสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง แสดงดังรูปที่ 3.19 ซึ่งตัวอย่างในงานวิจัยนี้คือคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่มีเศษยิปซัมเป็นส่วนผสม เพื่อหาผลึกที่เกิดขึ้นจากการเติมเศษยิปซัมลงในส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.3)$$

เมื่อ n = ลำดับการเลี้ยวเบน (เลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 1, 2, 3,...)
 λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (Å หรือ อังสตรอม)
 d = ระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่รังสีตกกระทบ
 θ = มุมตกกระทบ (องศา)



รูปที่ 3.19 ภาพ Diffractogram จากเครื่อง XRD ของยิปซัม

3.6 การขึ้นรูปขึ้นทศอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

3.6.1 การออกแบบส่วนผสม

งานวิจัยครั้งนี้ ทำการออกแบบส่วนผสม โดยการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมในอัตราส่วนร้อยละ 5 15 30 50 70 และ 100 โดยน้ำหนัก คงที่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (w/b) ทุกส่วนผสมเท่ากับ 0.7 และควบคุมความหนาแน่นสดเท่ากับ 1,100 และ 1,300 kg/m³ แสดงดังตารางที่ 3.2

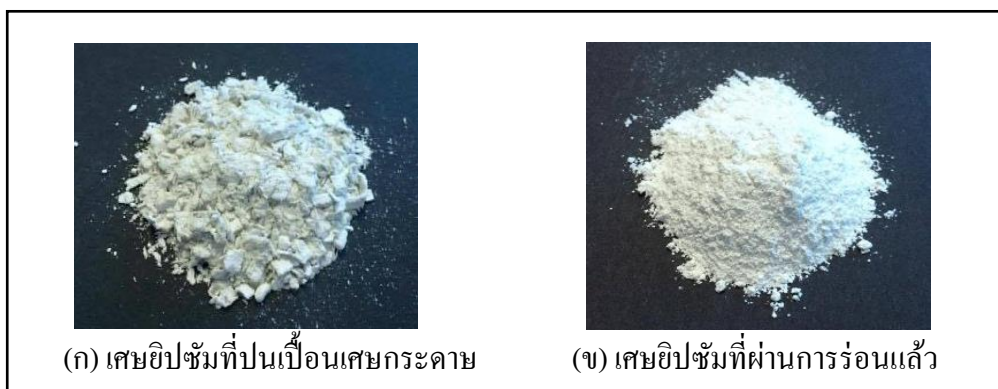
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

รหัสตัวอย่าง ชั้นทดสอบ	สัดส่วน (โดยน้ำหนัก)				ความหนาแน่น kg/m ³
	ซีเมนต์	น้ำ	ทราย	ยิปซัม	
G00D11	1	0.7	1	0	1,100
G05D11	1	0.7	0.95	0.05	1,100
G15D11	1	0.7	0.85	0.15	1,100
G30D11	1	0.7	0.70	0.30	1,100
G50D11	1	0.7	0.50	0.50	1,100
G70D11	1	0.7	0.30	0.70	1,100
G100D11	1	0.7	0	1	1,100
G00D13	1	0.7	1	0	1,300
G05D13	1	0.7	0.95	0.05	1,300
G15D13	1	0.7	0.85	0.15	1,300
G30D13	1	0.7	0.70	0.30	1,300
G50D13	1	0.7	0.50	0.50	1,300
G70D13	1	0.7	0.30	0.70	1,300
G100D13	1	0.7	0	1	1,300

หมายเหตุ : G00 = คอนกรีตมวลเบาปกติ, G05-G100 = อัตราส่วนยิปซัมร้อยละ 5 ถึง 100, D = ความหนาแน่น

3.6.2 การเตรียมเศษยิปซัม

เศษยิปซัมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเศษยิปซัมที่เหลือจากกระบวนการผลิตยิปซัมบอร์ด ซึ่งมีเศษกระดาษปนเปื้อน ดังรูปที่ 3.20 (ก) จึงนำเศษยิปซัมมาผ่านตะแกรงเบอร์ 18 เพื่อแยกเศษกระดาษชิ้นใหญ่ออกและนำมาผ่านตะแกรงระหว่างเบอร์ 40 และ 140 เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดมากับเศษยิปซัม โดยเลือกให้มีขนาดอยู่ระหว่างร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 แต่ไม่เกิน 140 ดังรูปที่ 3.20 (ข)



(ก) เศษขี้ปซัมที่ป่นเหมือนเศษกระดาษ

(ข) เศษขี้ปซัมที่ผ่านการร่อนแล้ว

รูปที่ 3.20 เศษขี้ปซัมที่ป่นเหมือนเศษกระดาษและเศษขี้ปซัมที่ผ่านการร่อนแล้ว

3.6.3 การเตรียมโฟม

โฟมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ทำได้โดยนำสารก่อโฟมมาเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน สารก่อโฟมต่อน้ำ 1 : 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำให้เป็นฟองโฟมด้วยเครื่องสร้างโฟมที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดอากาศที่ความดัน 4.5 bar เพื่อให้ได้โฟมที่มีฟองอากาศขนาดเล็กตั้งแต่ 0.1-1.0 mm ซึ่งความหนาแน่นของโฟมประมาณ 50 kg/m^3 ตามมาตรฐาน (ASTM C796) แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การผสมโฟมในคอนกรีตมวลเบาแบบ Pre-formed foam method

3.6.4 การหล่อขึ้นทดสอบ

การหล่อขึ้นทดสอบคอนกรีตลงในแบบหล่อชนิดต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.4.3 ก่อนการหล่อคอนกรีตจะใช้น้ำมันทาบาง ๆ ที่ด้านในของแบบหล่อเพื่อให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น หลังจากผสมคอนกรีตเสร็จจะทำการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อมาตรฐาน 0

จากนั้นใช้แท่งกระทุ้ง 40 ครั้ง เพื่อให้คอนกรีตไหลเข้าแบบหล่อทั่วถึงกัน ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงทำการปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบร้อย

3.6.5 การถอดแบบและการบ่ม

หลังจากเทคอนกรีต 24 ชั่วโมงจะทำการถอดแบบหล่อออก แล้วนำชิ้นทดสอบ ไปทำการบ่มโดยวิธีหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ดังรูปที่ 3.22 โดยแผ่นพลาสติกจะต้องแนบกับผิวของคอนกรีต จากนั้นนำชิ้นทดสอบใส่ไว้ในถุงพลาสติกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 23.0 ± 2.0 °C จนกว่าจะครบ 28 วัน หรือถึงวันทดสอบ (ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน)



รูปที่ 3.22 การบ่มโดยวิธีหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน

3.7 การทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

3.7.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength test) ของชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาขนาด $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ที่มีอายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน โดยใช้ด้านที่เรียบของชิ้นทดสอบ สองด้านตรงกันข้ามเป็นด้านรับแรง ซึ่งผิวหน้าด้านที่ปาดให้เรียบจะตั้งฉากกับแกนของ

แรงกด และจะให้แรงจนกระทั่งคอนกรีตเกิดความเสียหายและไม่สามารถรับแรงที่สูงขึ้นได้ต่อไป อีกตามมาตรฐาน (ASTM C109) ค่ากำลังรับแรงอัด (C_s) แสดงดังสมการที่ (3.4)

$$C_s = \frac{P_u}{A} \quad (3.4)$$

เมื่อ	C_s	คือ	กำลังรับแรงอัด (kg/m^2)
	P_u	คือ	น้ำหนักกดสูงสุดของชิ้นทดสอบ (kg)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของชิ้นทดสอบ (m^2)

3.7.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของคอนกรีตมวลเบาสามารถทำได้ โดยนำคอนกรีตขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม. ที่อายุบ่ม 28 วัน แช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดให้นำขึ้นจากน้ำแล้วใช้ผ้าซับน้ำที่ผิวของชิ้นทดสอบและชั่งน้ำหนักภายในเวลา 30 วินาที ซึ่งค่าที่ได้คือน้ำหนักเปียก (Wet weight) โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 kg จากนั้นทำการอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ ค่าที่ได้คือน้ำหนักอบแห้ง (Dry weight) ของชิ้นทดสอบ ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2 โดยทำการทดสอบ 3 ชิ้นทดสอบเป็นอย่างน้อย รายละเอียดวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C642) แสดงดังสมการที่ (3.5)

$$W_a = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ	W_a	คือ	การดูดซึมน้ำ (%)
	W_w	คือ	น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก (kg)
	W_d	คือ	น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง (kg)

3.7.3 การทดสอบการนำความร้อน

การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านโดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดบริเวณที่ร้อนกว่าหรือมีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลมากไปสู่บริเวณที่เย็นกว่า วัสดุจะมีการนำความร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล วัสดุที่มีความหนาแน่นมากจะนำความร้อนได้มาก วัสดุที่จะนำความร้อนได้

ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity ใช้สัญลักษณ์ k) โดยวัดค่าในรูปของอัตราปริมาณความร้อนไหลต่อหน่วยเวลาจากจุดระยะทางหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่านและหน่วยวัดอุณหภูมิวัดเป็น W/m.K หรือ W/m.°C

ขั้นตอนที่ใช้สำหรับการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เมื่ออายุบ่ม 28 วัน พื้นที่ผิวหน้าสัมผัสของชิ้นทดสอบ (A) เรียบทั้งสองด้าน การทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาสามารถหาได้จาก เครื่องทดสอบการนำความร้อนที่ให้ปริมาณความร้อนไหลผ่านชิ้นทดสอบ (Q) ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดความร้อนบนผิวสัมผัสด้านหนึ่งของแท่งทองแดงซึ่งอยู่ติดกับชิ้นทดสอบ จนทำให้แท่งทองแดงมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C และผิวสัมผัสของชิ้นทดสอบอีกด้านที่อยู่ตรงกันข้ามจะสัมผัสอยู่กับแท่งทองแดงที่ควบคุมให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องโดยการหล่อเย็นด้วยน้ำหมุนวนเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ทำการวัดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ของชิ้นทดสอบสองจุดที่มีระยะห่าง (L) เท่ากับ 55 mm จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การทดสอบการนำความร้อนตามมาตรฐาน (ASTM E1225) แสดงดังสมการที่ (3.6)

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (3.6)$$

เมื่อ	k	คือ	Thermal conductivity (W/m.K หรือ W/m.°C)
	Q	คือ	ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านตัวอย่างทดสอบ (Watt หรือ W)
	L	คือ	ความหนาของตัวอย่างทดสอบ (m)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดขวาง (m ²)
	ΔT	คือ	ผลต่างระหว่างจุดที่วัดอุณหภูมิ (K หรือ °C)

3.7.4 การทดสอบการหดตัวของคอนกรีตแบบแห้ง

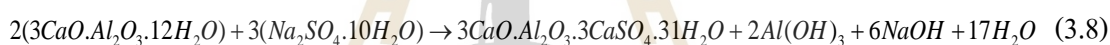
การหดตัวของคอนกรีตในงานวิจัยนี้วัดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาขนาด 25 mm × 25 mm × 285 mm ที่อายุบ่ม 1 3 7 14 และ 28 วัน เพื่อดูการหดตัวของคอนกรีต สำหรับการวัดค่าการหดตัว ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 23.0 ± 2.0 °C ตลอดการทดสอบ สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของแท่งทดสอบคอนกรีต ตามมาตรฐาน (ASTM C 157) ตามสมการที่ (3.7)

$$\Delta L = \frac{(L_t - L_0)}{L_G} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ	ΔL	คือ	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความยาว
	L_t	คือ	ค่าการวัดความยาวของคอนกรีตที่เวลาใด ๆ
	L_0	คือ	ค่าการวัดความยาวของคอนกรีตเริ่มต้น
	L_G	คือ	ค่าความยาวของแท่งตัวอย่างมาตรฐาน (ประมาณ 285 mm)

3.7.5 การทดสอบการขยายตัวของคอนกรีต

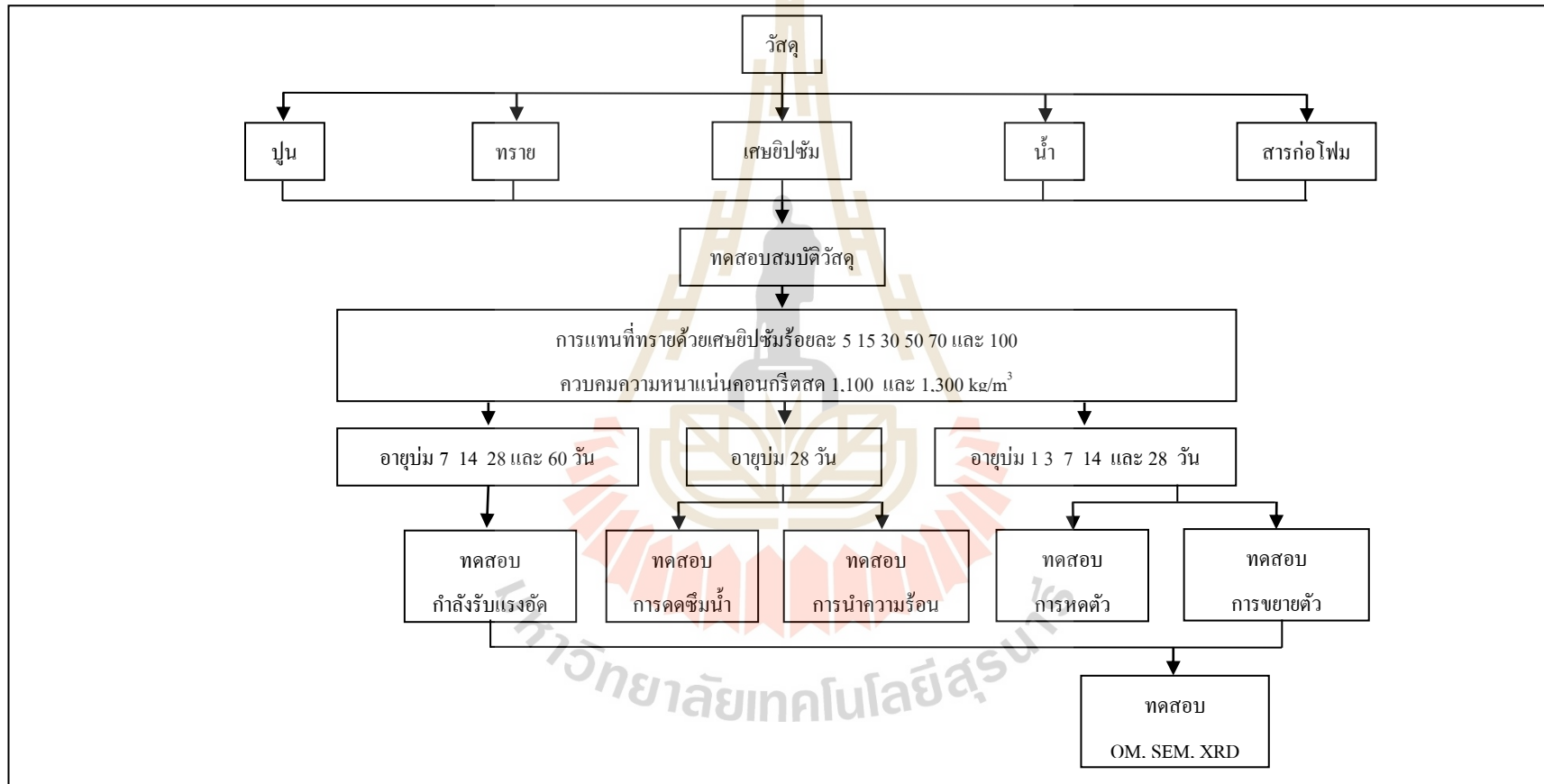
การขยายตัวของคอนกรีตจะทำการทดสอบ โดยการแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ความเข้มข้น 5% ตามมาตรฐาน (ASTM C1012-95a) ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (C-A-H) ของ C_3A ก่อให้เกิดเอ็ททริงไกด์ ดังสมการที่ (3.8)



หลังจากถอดแบบแล้วให้นำแท่งตัวอย่างขนาด $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$ ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ภาชนะที่ใส่สารละลายจะต้องเป็นภาชนะมีฝาปิดมิดชิดเพื่อไม่ให้ไอระเหยออก เก็บไว้ที่ อุณหภูมิ $23.0 \pm 2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ จนครบ 28 วัน แล้วให้นำตัวอย่างขึ้นจากสารละลาย ทำความสะอาดผิวและเช็ดให้แห้ง หลังจากนั้นจึงทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของแท่งทดสอบ ตามสมการที่ 3.6 สารละลายที่ใช้แช่แท่งตัวอย่างจะต้องเปลี่ยนใหม่ทุกครั้งที่มีการวัดค่า

3.8 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

แผนภาพการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.9 สรุป

วิธีการดำเนินงานวิจัยที่นำเสนอในบทที่ 3 นี้เป็นรายละเอียดวิธีการดำเนินงาน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลยิปซัม โดยใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงการทดสอบและวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน

การทดสอบ	ขนาดชิ้นงาน	อายุบ่ม (วัน)	วิธีทดสอบ
กำลังรับแรงอัด (ASTM C 109)	50 mm × 50 mm × 50 mm	7, 14, 28 และ 60	ก่อนทดสอบชิ้นงานจะต้องวัดขนาดของชิ้นงาน ชั่งน้ำหนัก จากนั้นทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบรุ่น NRI-TS500-50
การดูดซึมน้ำ (ASTM C642)	100 mm × 100 mm × 100 mm	28	นำชิ้นทดสอบแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นมาเช็ดผิวให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักเปียก แล้วนำเข้าสู่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลังอบ
การนำความร้อน (ASTM E1225)	Ø69 mm × 75 mm	28	วัดขนาดของชิ้นทดสอบแล้วนำชิ้นทดสอบใส่เครื่องทดสอบการนำความร้อนที่ให้ปริมาณความร้อนด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดจนทำให้แท่งทองแดงมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C ทำการวัดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ของชิ้นทดสอบสองจุดที่มีระยะห่าง 55 mm
การหดตัวแห้ง (ASTM C 157)	25 mm × 25 mm × 285 mm	1,7, 14 และ 28	วัดขนาดของชิ้นตัวอย่างตามอายุบ่มด้วยเครื่องวัดขนาด รุ่น HM-250D
การขยายตัว (ASTM C1012 -95a)	25 mm × 25 mm × 285 mm	28	หลังถอดแบบให้นำชิ้นตัวอย่างมาวัดขนาดแล้วนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำขึ้นจากสารละลายเพื่อวัดขนาดของชิ้นตัวอย่างหลังทดสอบ

บทที่ 4

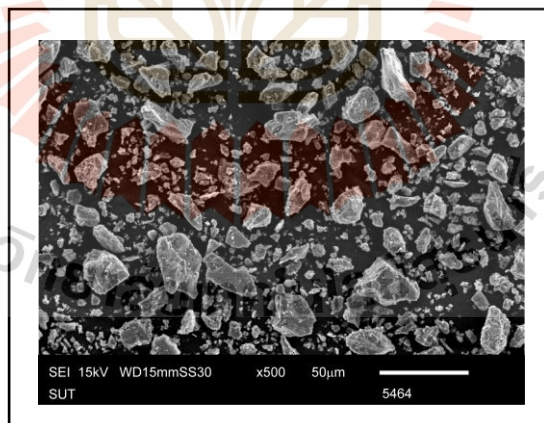
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 บทนำ

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ซึ่งแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการรีไซเคิลเศษยิปซัมโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยทางกายภาพและทางจุลภาค

4.2 สมบัติของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียดทางเคมี

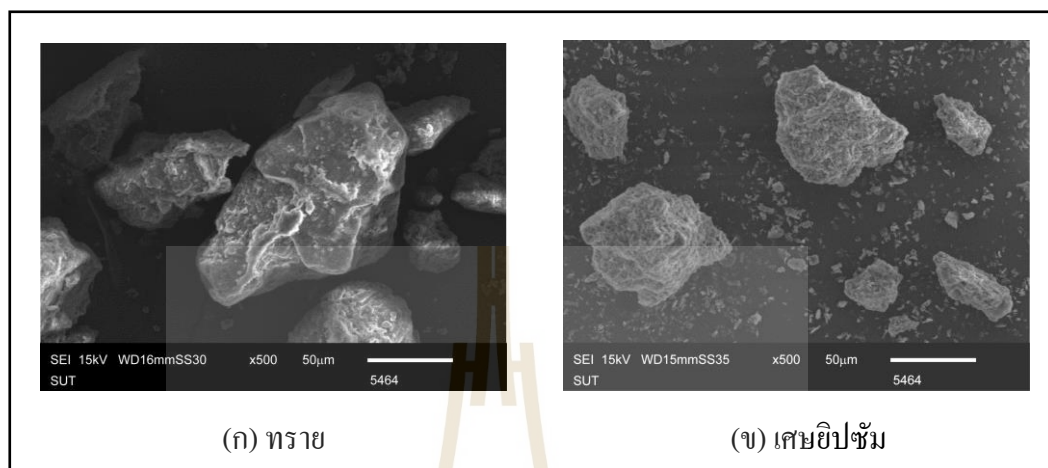
จากภาพถ่ายของวัสดุยึดประสาน (ปูนซีเมนต์) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของปูนซีเมนต์ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากภาพถ่ายของวัสดุมวลรวมละเอียด (ทราย และเศษยิปซัม) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่า ทรายมีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนกึ่งมนกึ่งเหลี่ยม ผิวขรุขระ ในขณะที่เศษยิปซัมมีลักษณะ

รูปร่างเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระ จึงพื้นที่ผิวสัมผัสมากเนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับทราย



รูปที่ 4.2 ภาพขยายของทราย และเศษขี้ปิ้งด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

4.2.1 องค์ประกอบทางเคมี

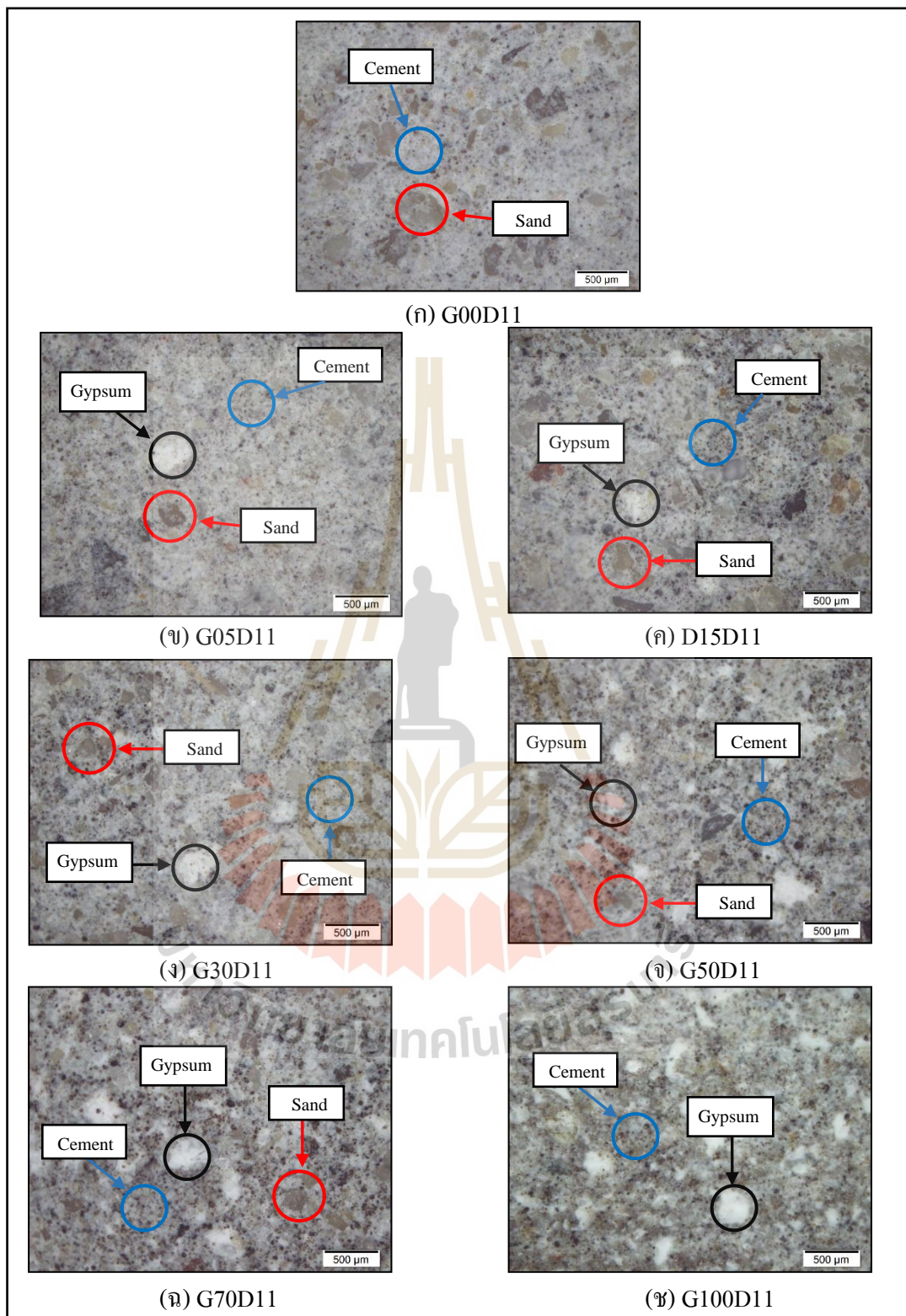
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสาน (ปูนซีเมนต์) โดยเครื่องทดสอบ XRF แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบออกไซด์หลัก (Major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO_2), เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3), และอะลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละ 92.73 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor oxides) ได้แก่ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), และออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O และ K_2O) และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น ซึ่งออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่สำคัญอยู่ 4 ชนิดคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: C_3S), ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: C_2S), ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$: C_3A) และ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$: C_4AF)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (เฉลิมชัย ไชยณรงค์, 2559)

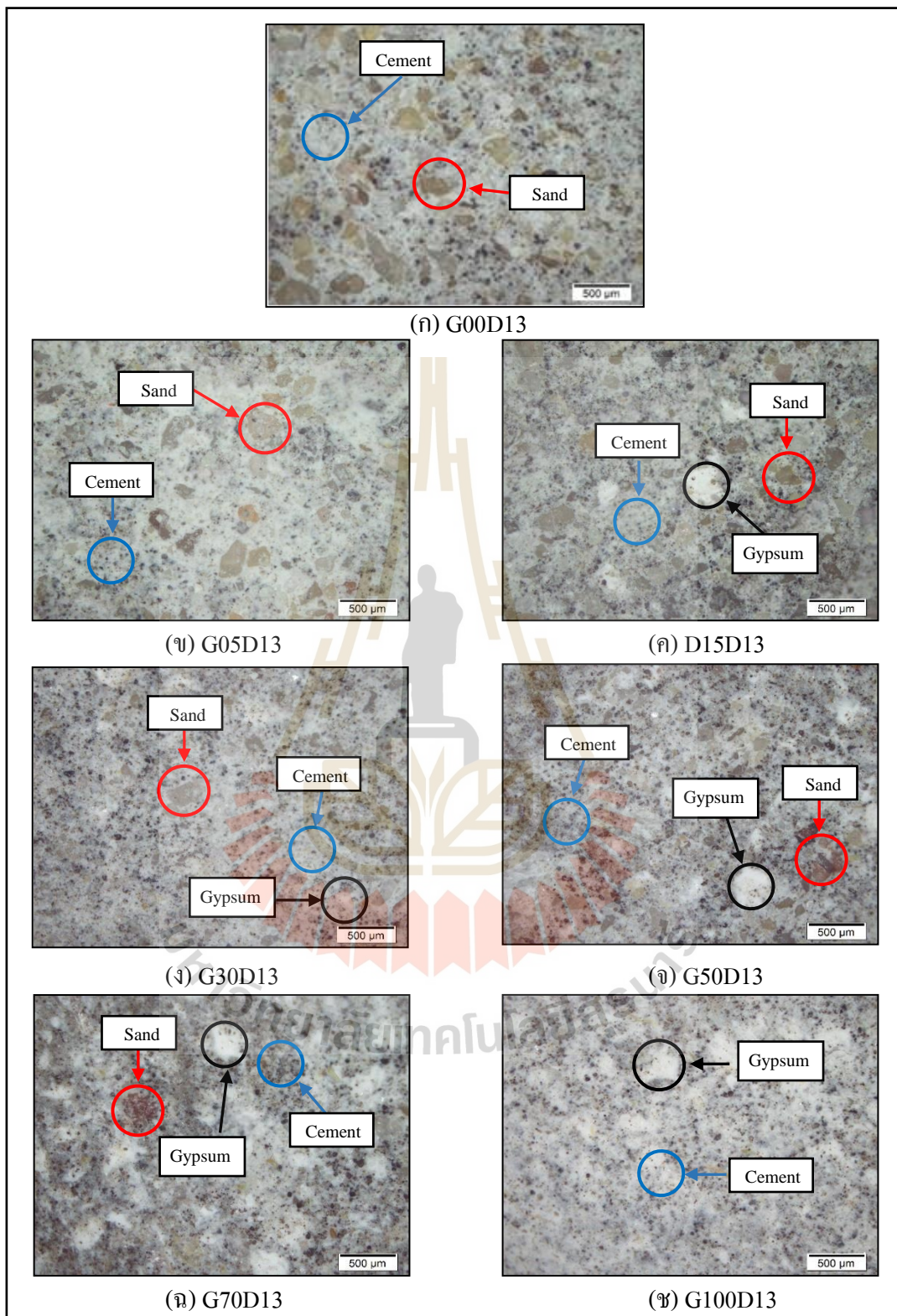
องค์ประกอบเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ร้อยละโดยมวล)
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.33
ซิลิกา (SiO ₂)	18.60
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	4.03
อลูมินา (Al ₂ O ₃)	3.77
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.67
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.13
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	1.39
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.46
สารประกอบอื่น ๆ	1.00
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (loss on ignition หรือ LOD)	N/A
CaO + SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	92.73
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ + CaO + MgO	-

4.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์ออปติคัลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

การวิเคราะห์ภาพถ่ายหน้าตัดเรียบ (Polished section) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัลที่กำลังขยาย 5 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D11) มีปูน (เฟสสีเทา) และมวลรวมรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) เนื้อซีเมนต์ค่อนข้างขรุขระ กระจายตัวได้ดีทั่วทั้งหน้า ตัดสำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัม (G0511 G15D11 G30D11 G50D11 G70D11 และ G100D11) มีคอนกรีต (เฟสสีเทา) มวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) และเศษยิปซัม (เฟสสีขาว) กระจายตัวได้ค่อนข้างดี โดยเนื้อของซีเมนต์เฟสขรุขระน้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ



รูปที่ 4.3 ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม
ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³



รูปที่ 4.4 ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม
ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$

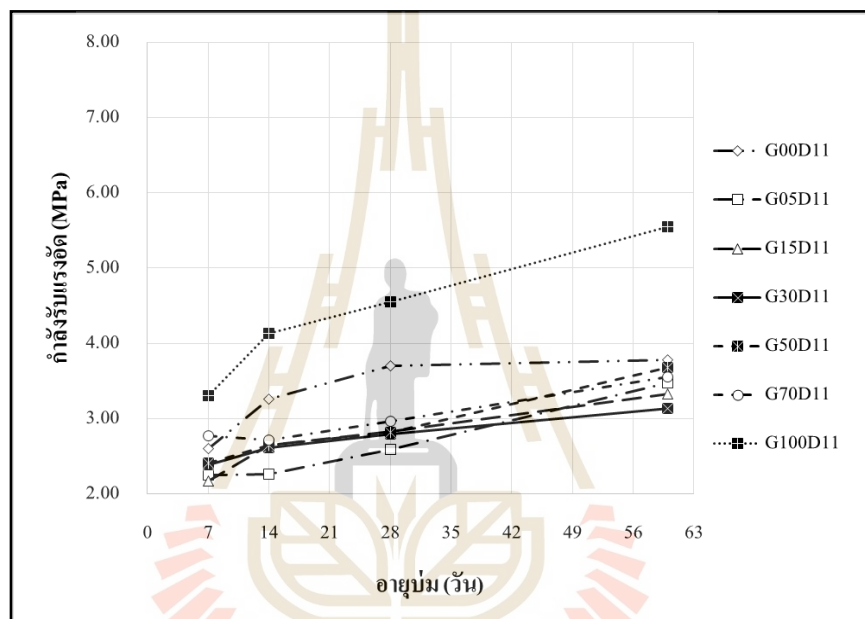
สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายผิวหนังตัดเรียบของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัลที่กำลังขยาย 5 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.30 พบว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D13) มีปูน (เฟสสีเทา) และมวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) เนื้อซีเมนต์ค่อนข้างขรุขระ กระจายตัวได้ดีทั่วทั้งหน้า ตัดสำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัม (G0513 G15D13 G30D13 G50D13 G70D13 และ G100D13) มีคอนกรีต (เฟสสีเทา) มวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) และเศษยิปซัม (เฟสสีขาว) กระจายตัวได้ค่อนข้างดี โดยเนื้อของซีเมนต์เฟสขรุขระน้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ จากการเปรียบเทียบคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ (G00D11) และที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ (G00D13) พบว่าที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ มีเนื้อซีเมนต์เรียบกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติและคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัม ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$

4.4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

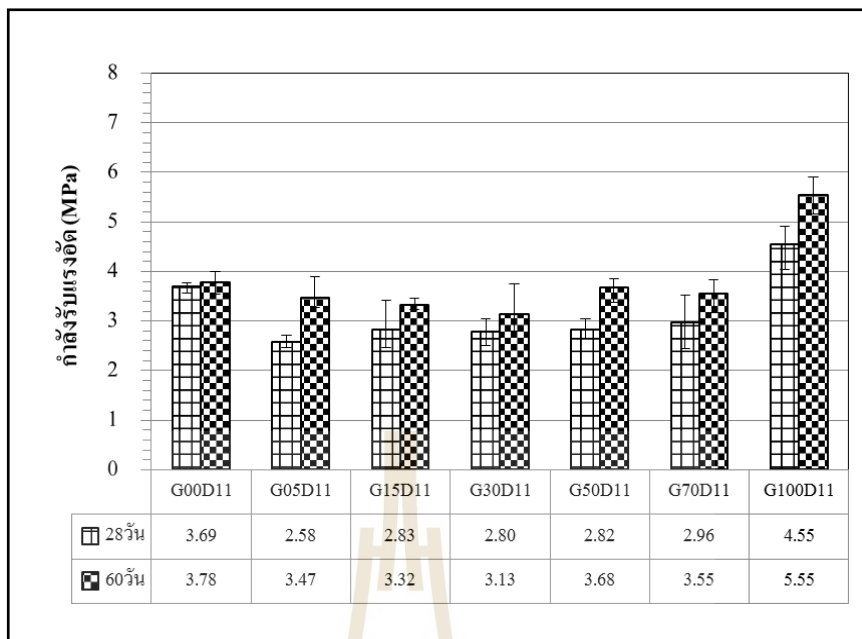
ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่อายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น $1,100$ และ $1,300 \text{ kg/m}^3$ แสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ รายละเอียดผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ ก.10 ในภาคผนวก ก. โดยค่าความหนาแน่นที่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 2601 จากการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมในคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 30 กำลังรับแรงอัดจะค่าลดลงตามลำดับ และเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมมีมากกว่าร้อยละ 30 กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการพัฒนาของกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกับน้ำ โดยที่กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากหลังจากการแข็งตัวแต่หลังจากอายุบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง

จากผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ แสดงดังรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมอายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ จากการทดสอบพบว่า การแทนที่ร้อยละ 100 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D11) โดยในช่วงแรกที่มีการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซมน้อยกว่าร้อยละ 30 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมจะลดลง และเมื่อการแทนที่ของคอนกรีตมวลเบามากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ รูปที่ 4.7 แสดงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมเมื่อเวลาผ่านไปกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้น ที่การแทนที่ร้อยละ 100

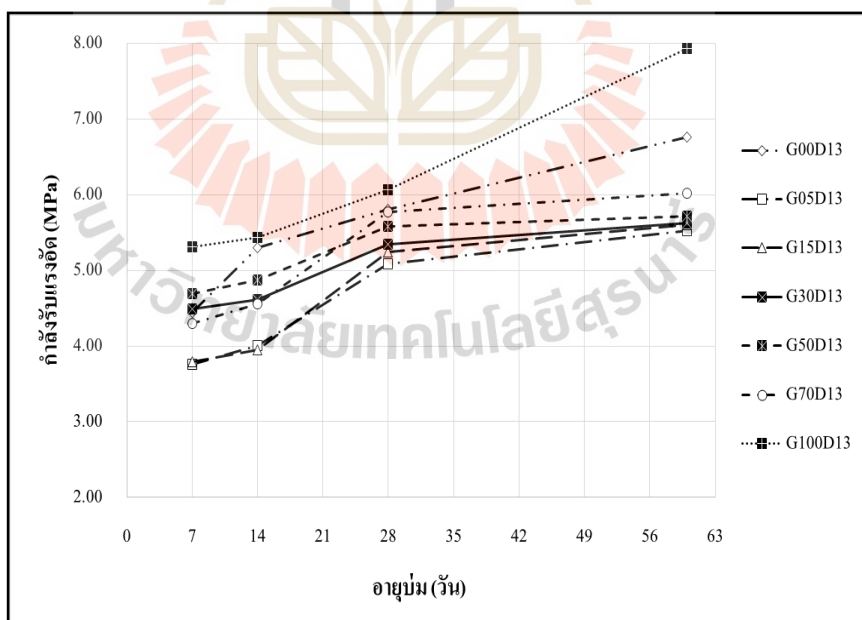
จะมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบปกติมาก สำหรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ อายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน แสดงดังรูปที่ 4.6 จากการทดสอบพบว่า การแทนที่ร้อยละ 100 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D13) ซึ่งการแทนที่ร้อยละ 100 ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบปกติเช่นเดียวกันกับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



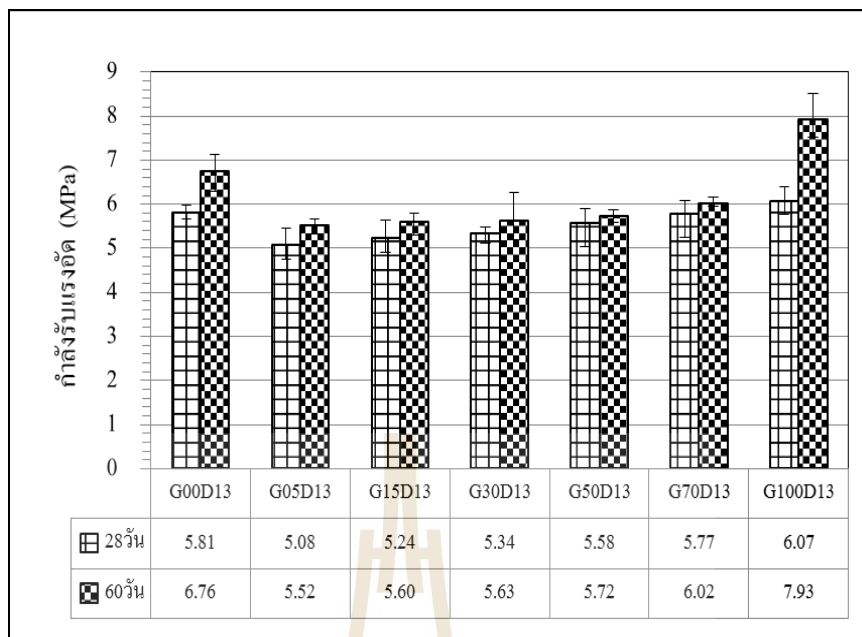
รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษขี้ปซัม
ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน



รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษขี้ปซัม
ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษยิปซัม
ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษยิปซัมอายุบ่ม 7 14 28 และ 60 วัน ความหนาแน่น $1,100$ และ $1,300 \text{ kg/m}^3$ (รูปที่ 4.4 และ 4.6 ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมที่การแทนที่ร้อยละ 5 15 30 50 และ 70 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ ซึ่งปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมร้อยละ 5 แสดงกำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด และการแทนที่ร้อยละ 100 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ

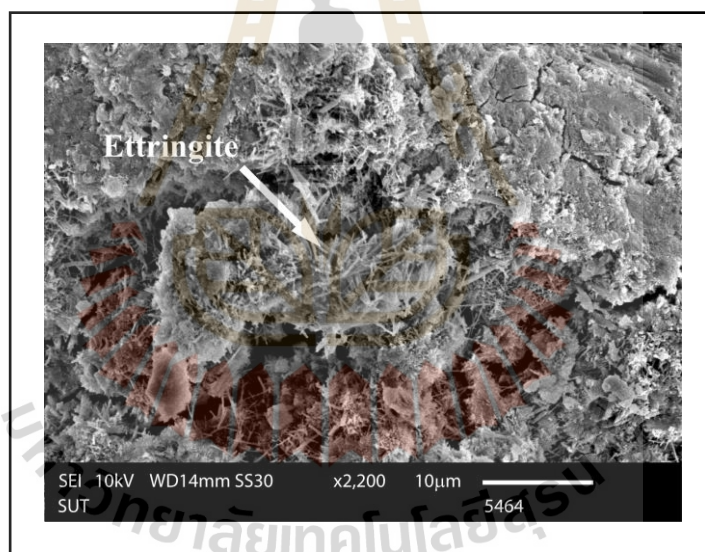
การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่ลดลงสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

1) การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมในปริมาณน้อย ส่งผลให้ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา ระหว่างโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) กับมวลรวมทรายมีมาก ซึ่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการแตกร้าว เนื่องจากปริมาณทรายในส่วนผสมมีมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกามาก ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง (เรืองรุชดี ชีระโรจน์, 2556)

2) เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) กับยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ทำให้เกิดเอ็ทริงไกต์ (Ettringite) โดยการเกิดเอ็ทริงไกต์สามารถแบ่งได้เป็น 2

กรณี กรณีแรกคือเกิดเอ็ททริงไคต์ที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย และกรณีที่สองคือเอ็ททริงไคต์ที่เกิดล่าช้าก่อให้เกิดความเสียหายคือ เอ็ททริงไคต์ที่เกิดล่าช้า (Delayed ettringite formation, DEF) ในช่วงปลายของอายุบ่ม ซึ่งเกิดในโพรงหรือในช่องว่างระหว่างโพรงของคอนกรีต รอยแตกหรือตามขอบมุม โดยรูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายผิวการแตกหัก (SEM) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 5 พบว่าการเกิดของเอ็ททริงไคต์ส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณโพรง หรือในรอยร้าวที่อยู่ในคอนกรีตทำให้คอนกรีตทำให้คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมเกิดการขยายตัวของโพรงหรือเกิดรอยร้าวซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

3) การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่บริเวณผิวของเศษยิปซัมที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างยิปซัมที่น้อยกับน้ำที่มากจนเกินไปส่งผลให้การเกิดของผลึกเอ็ททริงไคต์สามารถพัฒนาต่อส่งผลให้เกิดความเสียหายจากภายใน กำลังรับแรงอัดจึงลดลง



รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายผิวการแตกหัก (SEM) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 5

การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

1) เศษยิปซัมมีรูปร่างเหลี่ยมมุมและผิวที่ขรุขระ ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับยึดเหนี่ยว (bond) ระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์มีมากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นมากกว่าคอนกรีตปกติ

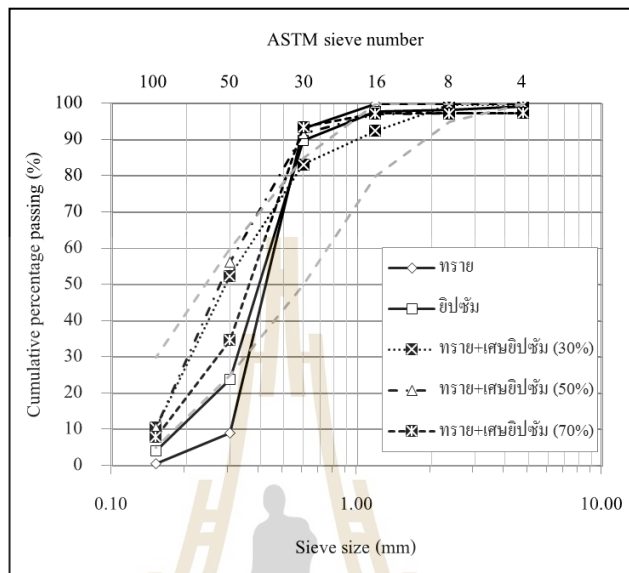
2) ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษยิปซัม ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่บริเวณผิวของเศษยิปซัม คือซีเมนต์เพสต์สามารถยึดเกาะบริเวณผิวของเศษยิปซัม ได้ อีกทั้งการดูดซึมน้ำของเศษยิปซัวยังทำหน้าที่คล้ายสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งสามารถลดน้ำส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น

3) การรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำและเศษยิปซัม ส่งผลให้เกิดขนาดคละของมวลรวมที่ดี ดังรูปที่ 4.10 เนื่องจากมวลรวมละเอียดทรายมีขนาดอนุภาคค่อนข้างละเอียดโดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.97 และเศษยิปซัมมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.85 ทำให้ช่องว่างของคอนกรีตมวลเบาลดลง คือ คอนกรีตมวลเบาเกาะตัวกันดี ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาดีขึ้น การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมร้อยละ 100 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบปกติ ขณะที่การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมร้อยละ 5 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง เนื่องจาก ปริมาณเศษยิปซัมที่น้อยและอัตราส่วนน้ำที่มากเกินไป ส่งผลให้ขนาดคละของมวลรวมที่ลดลง และการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่บริเวณผิวของเศษยิปซัมเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ กำลังรับแรงอัดจึงลดลง

ในรูปที่ 4.10 แสดงขนาดคละของมวลรวมละเอียดทราย เศษยิปซัม และการรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายและเศษยิปซัม แสดงให้เห็นว่า มวลรวมละเอียดทรายมีขนาดอนุภาคค่อนข้างละเอียดโดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.97 อีกทั้งเศษยิปซัมมีขนาดอนุภาคค่อนข้างหยาบโดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.85 ขณะที่อัตราส่วนการรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายและเศษยิปซัมเป็น 70:30 50:50 และ 30:70 ส่งผลให้เกิดขนาดคละของมวลรวมที่ดี ที่อยู่ในพื้นที่ของขอบเขตขนาดคละมวลรวมละเอียดที่ดี (Region of fine aggregates) โดยเฉพาะที่การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมร้อยละ 30 มีการรวมตัวของมวลคละที่ดีที่สุด ตามมาตรฐาน (ASTM C33) และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.60 2.31 และ 2.54 ตามลำดับ

4) การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัม ส่งผลให้ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา ระหว่างโปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O) และ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) กับมวลรวมทรายเป็นผลลบ ซึ่งปฏิกิริยาที่ทำให้

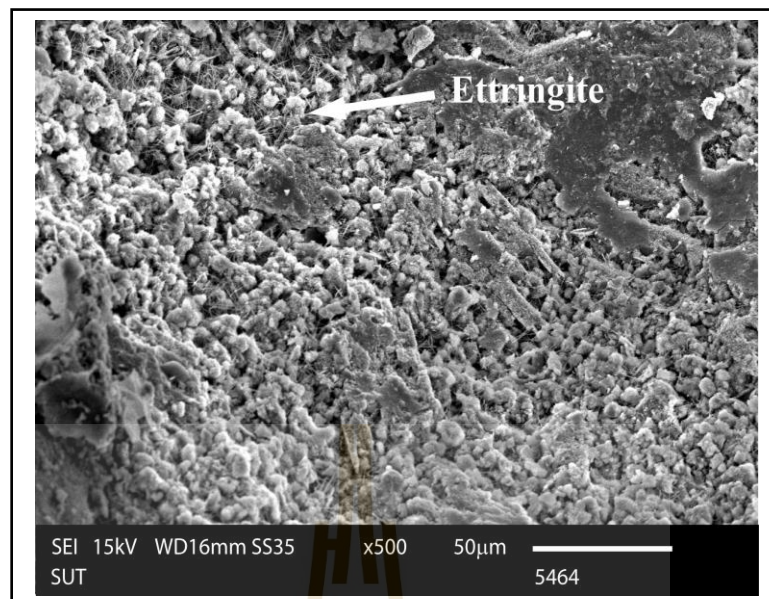
เกิดการแตกร้าวเนื่องจากปริมาณทรายในส่วนผสมลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น



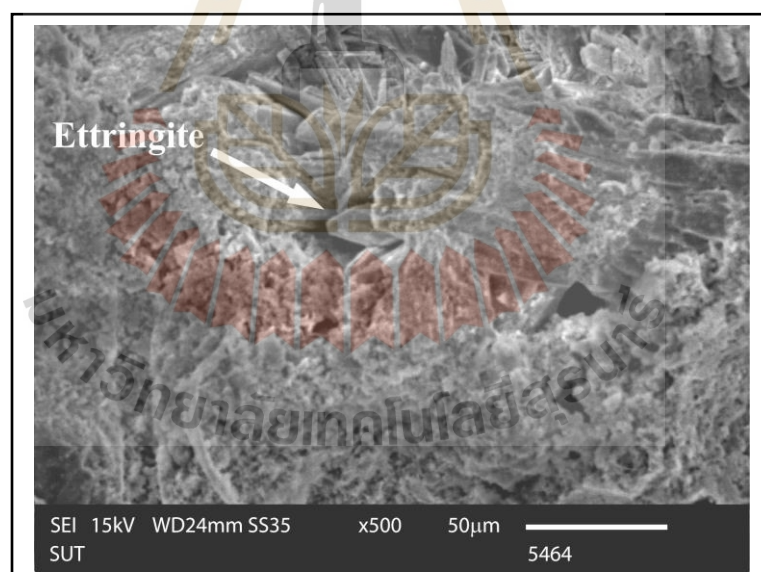
รูปที่ 4.10 การรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำและเศษอีปซัม

5) ปริมาณอีปซัมที่ใช้เป็นส่วนผสมเพื่อป้องกันการก่อตัวที่เร็วจนเกินไปของคอนกรีต ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) กับอีปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ทำให้เกิดเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งการเกิดของเอ็ททริงไกต์ที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย จะเกิดในช่วงอายุต้นๆ พร้อมกับการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของคอนกรีตมวลเบาแบบปกติ และคอนกรีตมวลเบาผสมเศษอีปซัมร้อยละ 100 ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบปกติมีการเกิดของเอ็ททริงไกต์ที่น้อยและจะเกิดในโพรงหรือในช่องว่างเท่านั้น ส่วนคอนกรีตมวลเบาผสมเศษอีปซัมร้อยละ 100 พบว่าการเกิดของเอ็ททริงไกต์จะเกิดรวมกับซีเมนต์ ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

การแทนที่ทรายด้วยเศษอีปซัมร้อยละ 5 15 30 50 70 และ 100 อายุบ่ม 28 วัน และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m^3 (รูปที่ 4.5 และ 4.7 ตามลำดับ) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงและผ่านเกณฑ์ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก.2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,001-1,200 (C12) และ 1,201-1,400 (C14) ที่ความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า 2.5 และ 5.0 MPa ตามลำดับ



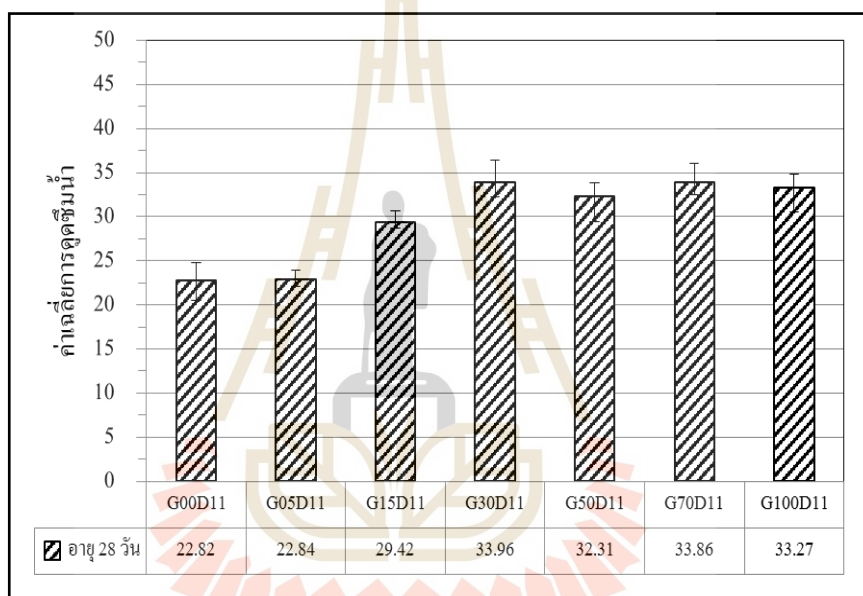
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายฝวการแตกหัก (SEM) ของคอนกรีตมวลเบาแบบปกติ



รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายฝวการแตกหัก (SEM) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัม ร้อยละ 100

4.5 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

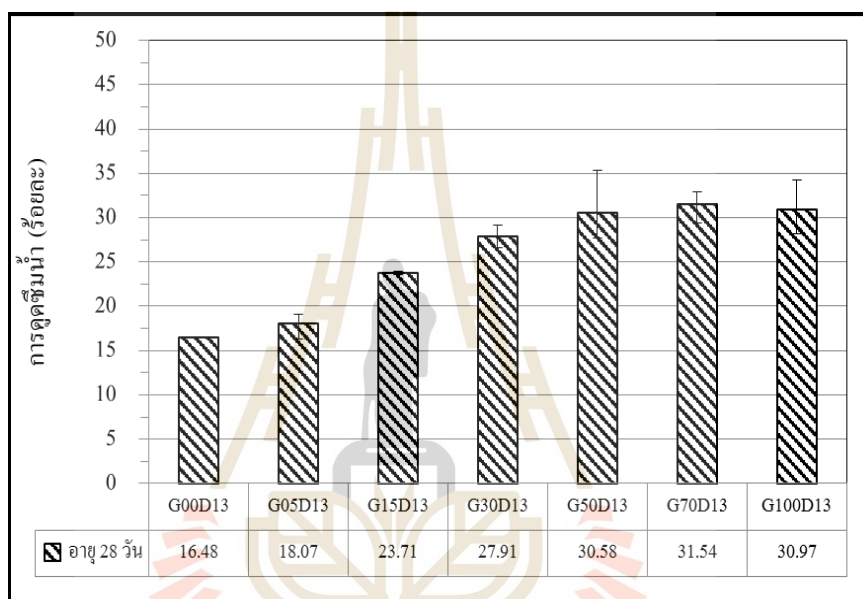
ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์แสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 โดยเป็นผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ ตามลำดับ รายละเอียดผลการทดสอบสามารถดูได้ในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก. 11 จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมเพิ่มมากขึ้น และการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมตั้งแต่ร้อยละ 30 ขึ้นไปจะเริ่มคงที่



รูปที่ 4.13 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³

รูปที่ 4.13 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมที่อายุบ่มอายุ 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมในการแทนที่ทรายตั้งแต่ร้อยละ 5 (G05D11) ถึง 100 (G100D11) มีค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D11) และเมื่อปริมาณการแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 30 ขึ้นไป ค่าการดูดซึมน้ำจะมีค่าใกล้เคียงกันหรือเริ่มคงที่ อาจเป็นผลมาจากการเกิดของเอ็ททริงไคด์ส่งผลให้ขนาดของรูพูนของคอนกรีตมวลเบาผสมยิปซัมเล็กลงหรือมีขนาดใกล้เคียงกัน

ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 4.14 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษยิปซัมที่อายุบ่ม 28 วัน ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมในการแทนที่ทรายร้อยละ 5 (G05D13) ถึง ร้อยละ 100 (G100D13) มีค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D13) และเมื่อปริมาณการแทนที่มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป ค่าการดูดซึมน้ำจะมีค่าใกล้เคียงกันหรือเริ่มคงที่ ซึ่งคล้ายกับคอกยกริตมวลเบาความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.14 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษยิปซัม
ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$

จากผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษยิปซัมที่อายุบ่ม 28 วัน ความหนาแน่น $1,100$ และ $1,300 \text{ kg/m}^3$ (รูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ) พบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัม ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมเพิ่มมากขึ้น การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตมวลเบาเนื่องจากเศษยิปซามีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าทราย และขนาดของมวลคละระหว่างยิปซั่มกับทราย ส่งผลให้มีช่องว่างในคอนกรีตมวลเบาเมื่อปริมาณยิปซั่มเพิ่มขึ้นการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากขนาดของมวลคละแปรผกผันกับความพรุนของคอนกรีตมวลเบา

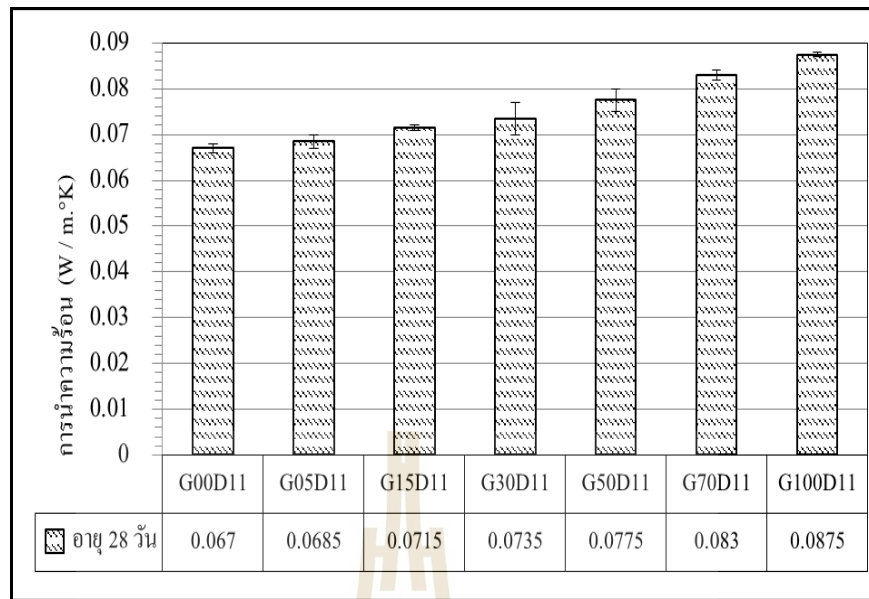
สำหรับในกรณีการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมร้อยละ 5 ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ มีค่าการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมาตรฐานเลขที่ มอก.2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,001-1,200 (C12) และ 1,201-1,400 (C14) ที่อัตราการดูดซึมน้ำไม่มากกว่าร้อยละ 23 และ 20 ตามลำดับ

4.6 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

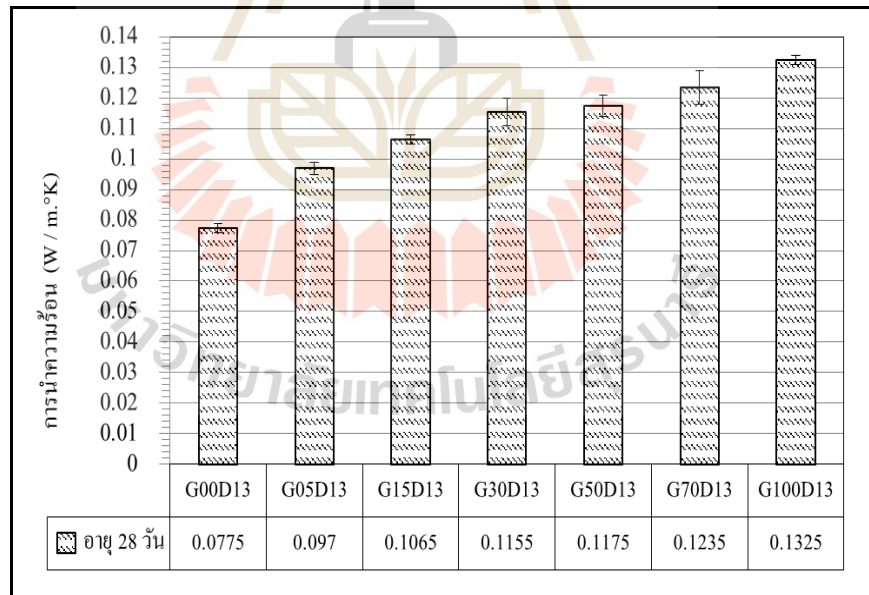
ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ ตามลำดับ รายละเอียดสามารถดูได้ในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.12 จากการทดสอบพบว่า ค่าการนำความร้อนคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ กล่าวคือ การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมมีผลต่อการนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมที่อายุบ่ม 28 วัน ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ แสดงดังรูปที่ 4.15 จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัม ในการแทนที่ ทรายมีค่าการนำความร้อน สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D11) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมที่ร้อยละ 5 มีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงคอนกรีตมวลเบาปกติมากที่สุด

รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมอายุบ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมในการแทนที่ทรายมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D13) มาก ที่มีการนำความร้อนใกล้เคียงเท่ากับ 0.0775 W/m.K เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมที่ร้อยละ 5 มีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงคอนกรีตมวลเบาปกติมากที่สุดเช่นเดียวกับคอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 1,100 kg/m³



รูปที่ 4.15 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษขี้ปิ้ง
ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



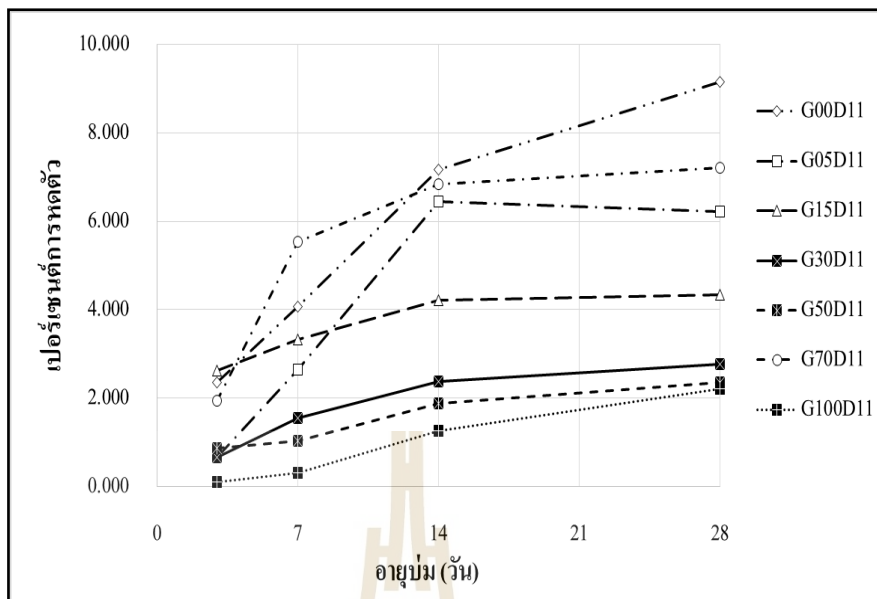
รูปที่ 4.16 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษขี้ปิ้ง
ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$

จากผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมอายุ บ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ (รูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ) พบว่า การ แทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัม ส่งผลให้การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อ เปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ การเพิ่มขึ้นของการนำความร้อนอาจเกิดจากขนาดของรูพรุน ในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมมีขนาดเล็กลง เนื่องจากยิปซัมมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ทราย ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนรวมในคอนกรีตมวลเบาลดลงขึ้น และยิปซัมมีคุณสมบัติคล้ายสารตัว หน่วงการแข็งตัวของคอนกรีต (มยูรี ปาลวงค์) ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ชะลอตัวออกไป ทำให้ผลิตผลไฮเดรชันมีเวลามากพอในการเข้าไปแทรกในช่องว่าง ทำให้ขนาดรู พรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาเล็กลง และทำให้วัสดุผสมจับตัวเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น กล่าวคือ คอนกรีตมวลเบาที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าการนำ ความร้อนที่มากขึ้นในอนาคตอาจมีการปรับปรุงและพัฒนาอัตราส่วนผสมเพื่อให้ค่าการนำความ ร้อนลดลง โดยการเพิ่มปริมาณของรูพรุนภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งสามารถทำได้โดยการเติมสารเพิ่ม ฟองเพื่อให้ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น

4.7 การทดสอบการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

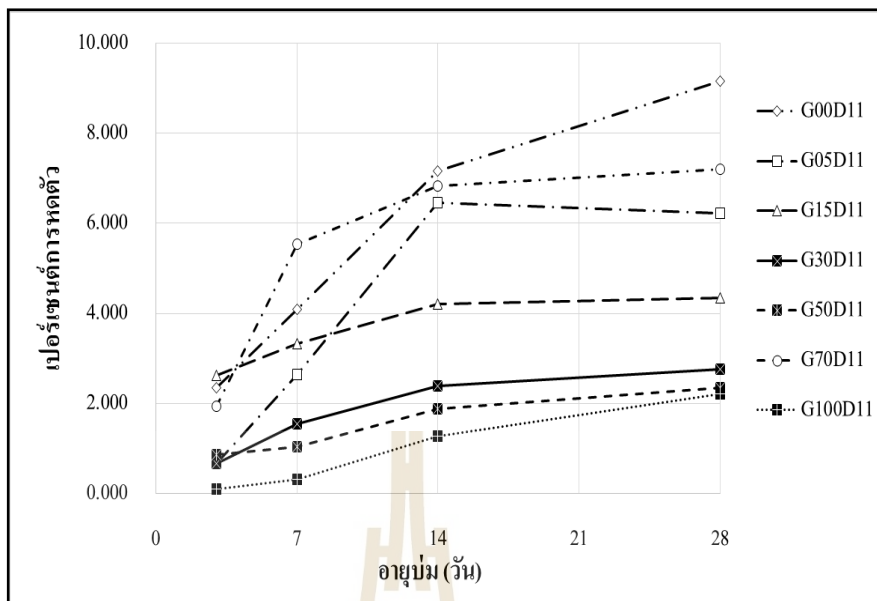
ผลทดสอบการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.13 และ ก.14 จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมมีค่าการหดตัว น้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ กล่าวคือ การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัว ของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมที่อายุบ่ม 1 3 7 14 และ 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัม ในการแทนที่ทรายร้อยละ 5 (G05D11) ถึงร้อยละ 100 (G100D11) มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวของ คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมมีแนวโน้มน้ำการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D11) คือ เมื่อปริมาณของยิปซัมเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมจะลดลง ดัง แสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษยิปซัม
ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³

ในทำนองเดียวกันผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษยิปซัมที่อายุบ่ม 1 3 7 14 และ 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมในการแทนที่ทรายร้อยละ 5 (G05D13) ถึงร้อยละ 100 (G100D11) มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมมีแนวโน้มการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D13) เนื่องจากเศษยิปซัมทำหน้าที่คล้ายสารลดน้ำทำหน้าที่ชะลอการแข็งตัวของคอนกรีต ส่งผลให้เมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยยิปซัมเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การหดตัวจึงลดลง กล่าวคือเมื่อปริมาณของยิปซัมเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.18



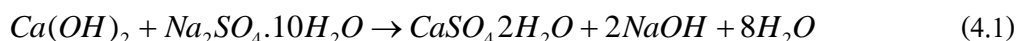
รูปที่ 4.18 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเสยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³

จากผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเสยิปซัมอายุบ่ม 1 3 7 14 และ 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ (รูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ) การแทนที่ทรายด้วยเสยิปซัม ส่งผลให้การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากการเพิ่มเสยิปซัมจะป้องกันไม่ให้เกิดการก่อตัวของคอนกรีตเกิดเร็วเกินไป หากปริมาณของเสยิปซามีมากเกินไปจะส่งผลให้การก่อตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นช้า ดังนั้นการหดตัวของคอนกรีตเมื่อเพิ่มเสยิปซัมจึงมีการหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตปกติ

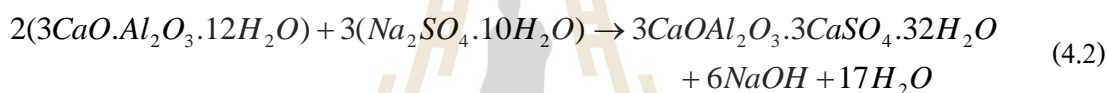
4.8 การทดสอบขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

ผลทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเทียบกับการขยายตัวในสภาวะปกติ เนื่องจากขั้นตอนทดสอบมีปริมาณเสยิปซำก่อนข้างมากจึงต้องทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาด้วยการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 5 % (การบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต) และการขยายตัวในสภาวะปกติ (การบ่มด้วยการห่อพลาสติก เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง) โดยผลทดสอบแสดงในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ รายละเอียดผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.

15 พบว่าหลังจากนำชิ้นทดสอบแฉะสารละลายโซเดียมซัลเฟตแล้วมีการขยายตัวที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการขยายตัวในสภาวะปกติ เนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดเป็นยิปซัม ดังสมการที่ 4.1

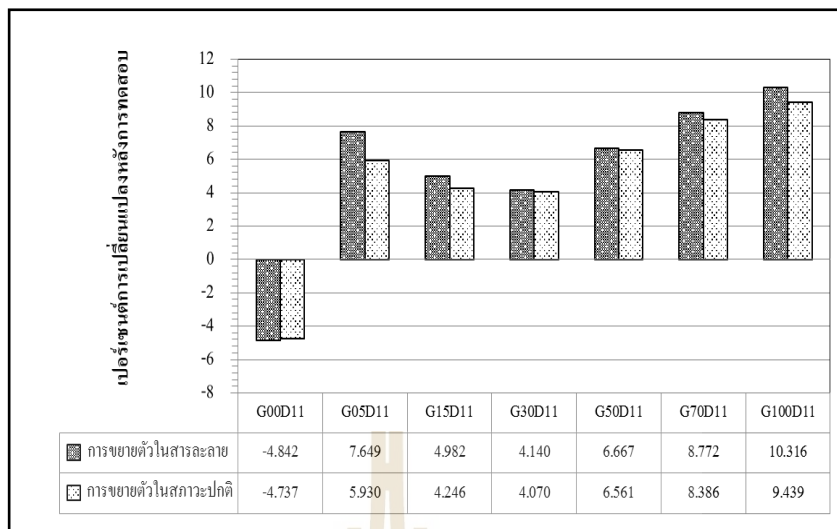


โดยน้ำจะซึมเข้าไปในเฟสอะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกมา ซึ่งผลของปฏิกิริยาจะเกิดการสะสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ทำให้เข้าสู่สภาวะสมดุล แต่จะมีซัลเฟตไดออกไซด์ (SO_2) ตกตะกอนกลายเป็นยิปซัม และปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต จะเกิดเป็นเอ็ททริงไกต์ ดังสมการที่ 4.2

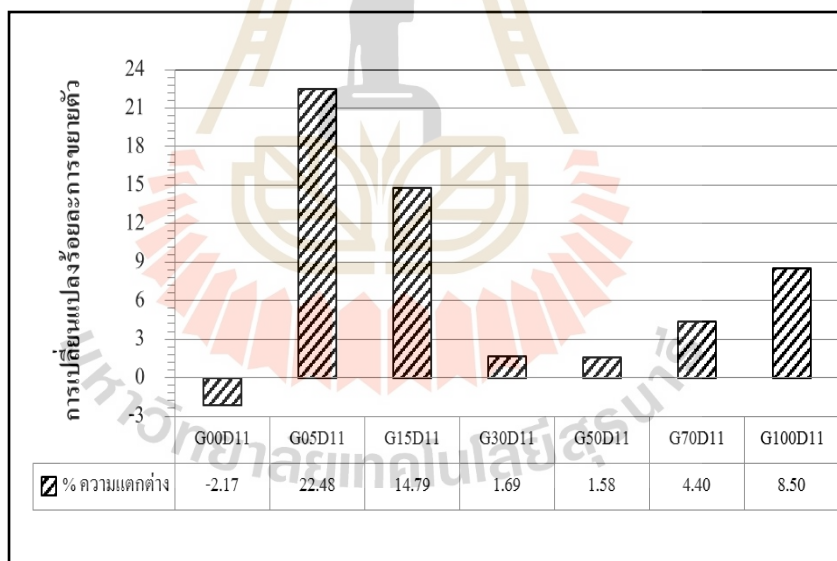


ยิปซัมที่ได้จากสมการที่ 4.1 ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ก่อให้เกิดเอ็ททริงไกต์ กล่าวคือกระบวนการกักตัวของสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะเปลี่ยนแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นยิปซัม และเมื่อรวมการเปลี่ยนแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตและยิปซัมจะเกิดเป็นเอ็ททริงไกต์ ส่งผลให้ปริมาตรของแข็งเพิ่มมากขึ้นเป็นสอง หรือเกิดเอ็ททริงไกต์เป็นสองเท่า

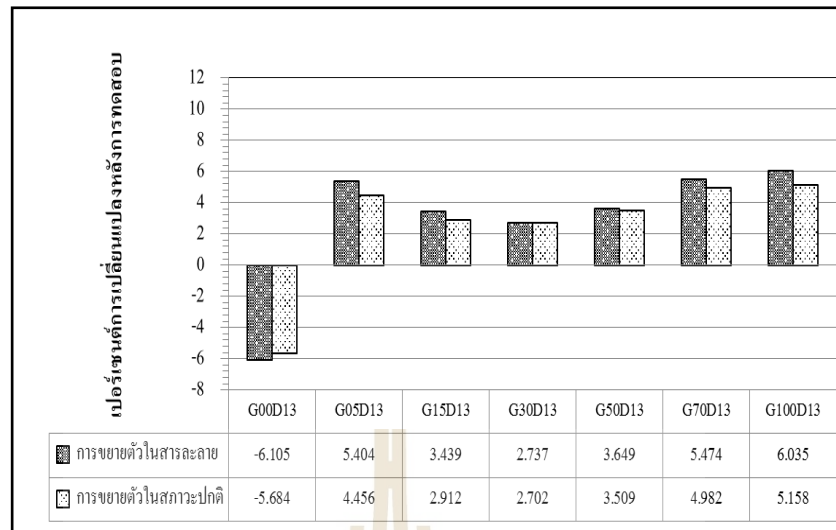
ผลการทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมที่อายุบ่ม 28 วัน ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ แสดงดังรูปที่ 4.19 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับการขยายตัวในสภาวะปกติ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมในการแทนที่ทรายมีร้อยละการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตสูงกว่าการขยายตัวในสภาวะปกติ และคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D11) ไม่มีการขยายตัวทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและในสภาวะปกติ แต่มีร้อยละการหดตัวเท่ากับ 4.842 และ 4.737 รูปที่ 4.20 แสดงผลเมื่อนำการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับการขยายตัวในสภาวะปกติ มาหาค่าความแตกต่างของการขยายตัว พบว่าการแฉะสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทำให้การขยายตัวเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$

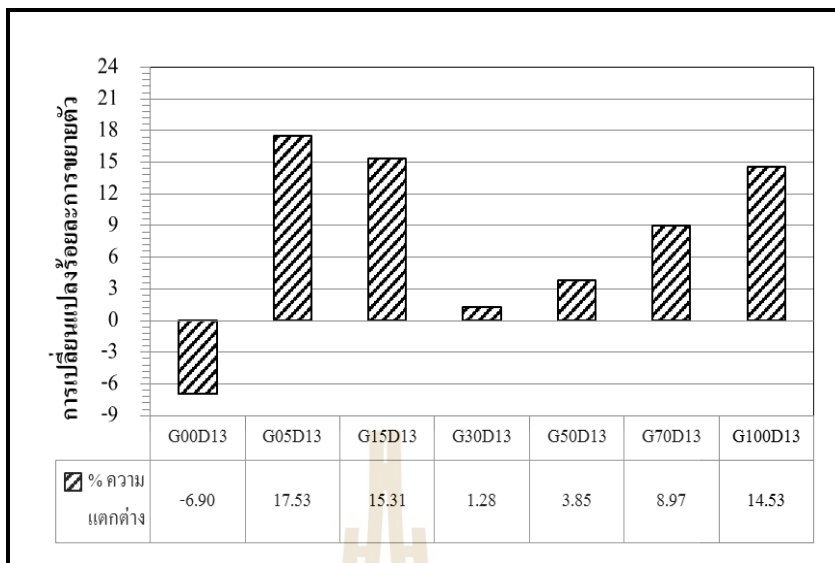


รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$

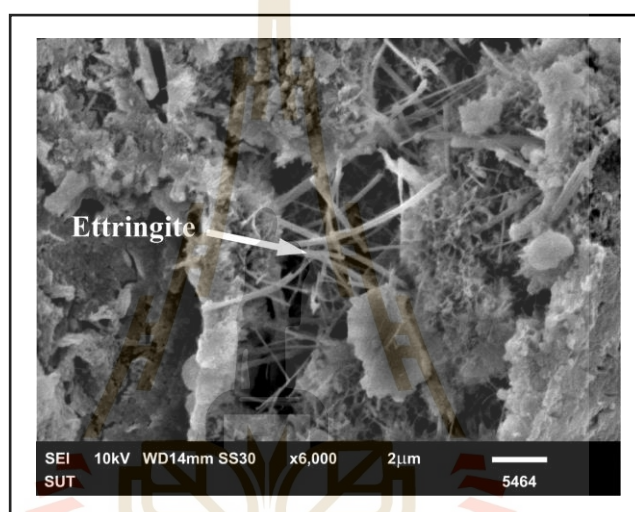
ในทำนองเดียวกันผลการทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมที่อายุบ่ม 28 วัน ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ แสดงดังรูปที่ 4.21 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับการขยายตัวในสภาวะปกติ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมในการแทนที่ทรายมีร้อยละการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตสูงกว่าการขยายตัวในสภาวะปกติ และคอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D13) ไม่มีการขยายตัวทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและในสภาวะปกติ แต่มีร้อยละการหดตัวเท่ากับ 6.105 และ 5.684 รูปที่ 4.22 แสดงผลเมื่อนำการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับการขยายตัวในสภาวะปกติ มาหาค่าความแตกต่างของการขยายตัว พบว่าการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ทำให้การขยายตัวเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมเพิ่มขึ้น



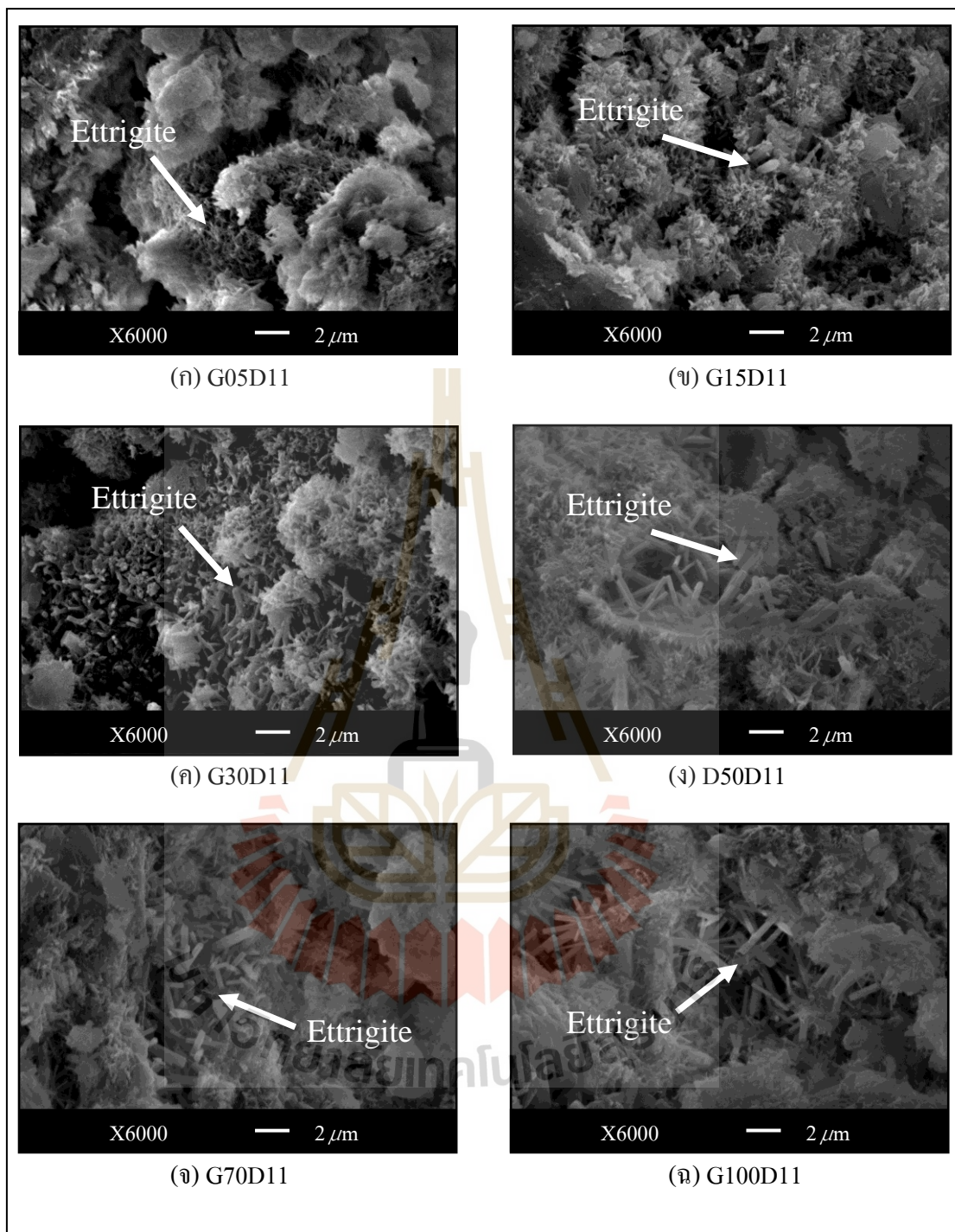
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงร้อยละการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³

จากผลการทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมอายุบ่ม 28 วัน ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ (รูปที่ 4.20 และ 4.22 ตามลำดับ) พบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัม ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ ส่งผลให้การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาที่การแทนร้อยละ 100 มีการขยายตัวสูงสุดและการแทนที่ร้อยละ 30 มีการขยายตัวต่ำสุด เนื่องจากการคละกั้นของมวลผสมระหว่างทรายกับยิปซัมมีการคละกั้นของมวลที่ดี ช่วยลดการเกิดของเอ็ททริงไคด์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าว การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัม ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ ส่งผลให้การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาที่การแทนร้อยละ 100 มีการขยายตัวสูงสุดและการแทนที่ร้อยละ 30 มีการขยายตัวต่ำสุดเช่นเดียวกันกับคอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C₃A) ที่อยู่ในปูนซีเมนต์กับยิปซัม ทำให้เกิดเอ็ททริงไคด์ปริมาณมาก เมื่อยิปซัมผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนตกับยิปซัมจะเกิดเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพพลาสติก กล่าวคือคอนกรีตอยู่ในสภาพที่ยังไม่แข็งและมีความยืดหยุ่น การขยายตัวของปริมาตรจึงเกิดก่อนที่ซีเมนต์จะแข็งตัว ในทางกลับกันหากปริมาณยิปซัมที่ผสมอยู่มากปฏิกิริยาจะเกิดต่อเนื่องไปหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัว อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าว มาตรฐานการขยายตัวของคอนกรีตควรขยายตัวน้อยกว่าร้อยละ 0.07 (ASTM C1012) ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าการขยายตัวสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด ในอนาคตอาจมีการปรับปรุงสัดส่วนผสมเพื่อลดอัตราการขยายตัว

จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายผิวการแตกหัก (Fractured surface) ของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ที่ไม่ได้แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 6,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D11) มีการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายและซีเมนต์เพสต์ได้ค่อนข้างดี และปริมาณของเอ็ททริงไคต์น้อยและมีขนาดเล็ก ขณะที่คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 5 (G05D11), 15 (G15D11), 30 (G30D11), 50 (G50D11), 70 (G70D11) และ 100 (G100D11) ปริมาณของเอ็ททริงไคต์จะมีมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณของยิปซัมเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.24

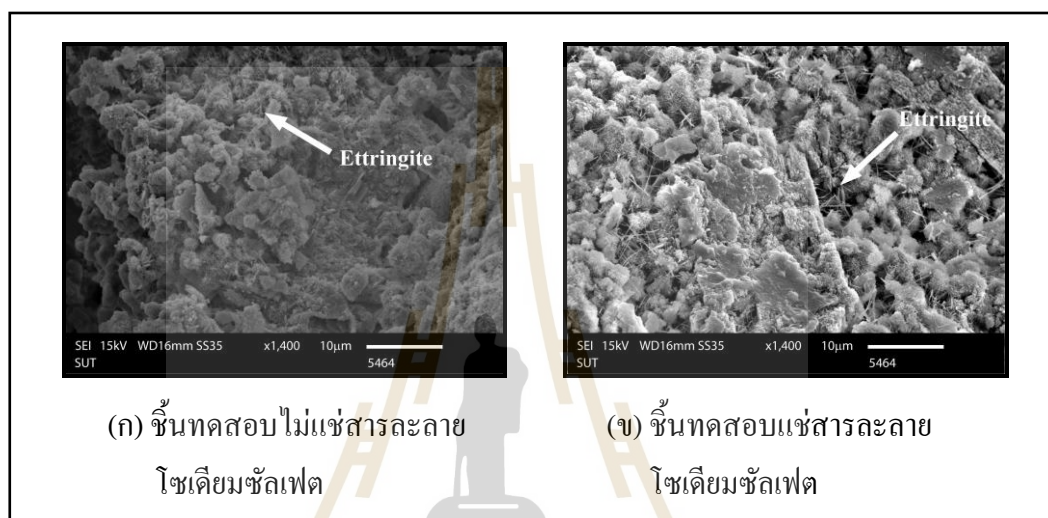


รูปที่ 4.23 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



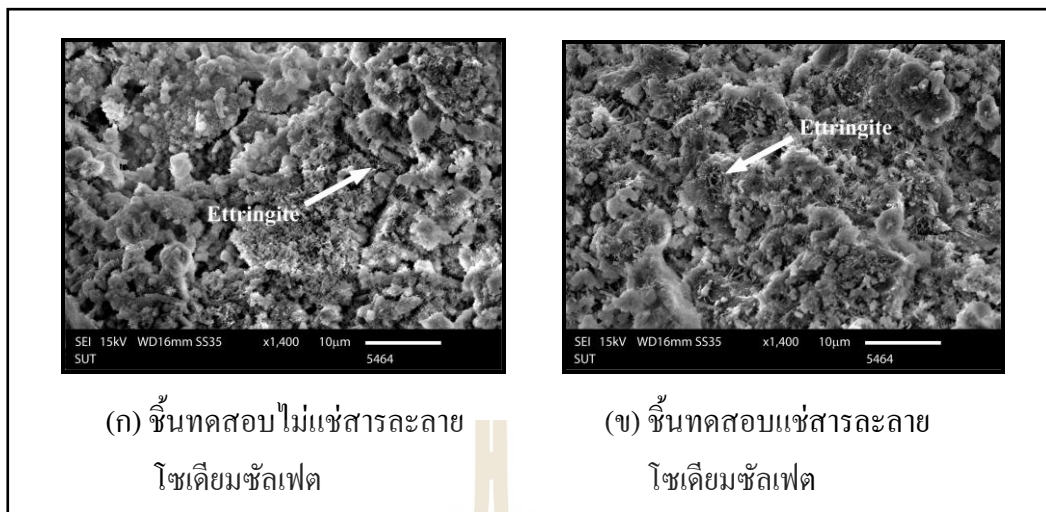
รูปที่ 4.24 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษขี้ปซัม
ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$

เมื่อนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ภาพถ่ายผิวการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,400 เท่า ของคอนกรีตมวลเบาโดยการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตมวลเบาแบบปกติที่ไม่ใช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต แสดงดังรูปที่ 4.25 (ก) และตัวอย่างที่ใช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต และ 4.25 (ข) พบว่า คอนกรีตมวลเบาแบบปกติมีปริมาณของเอ็ททริงไทต์ที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



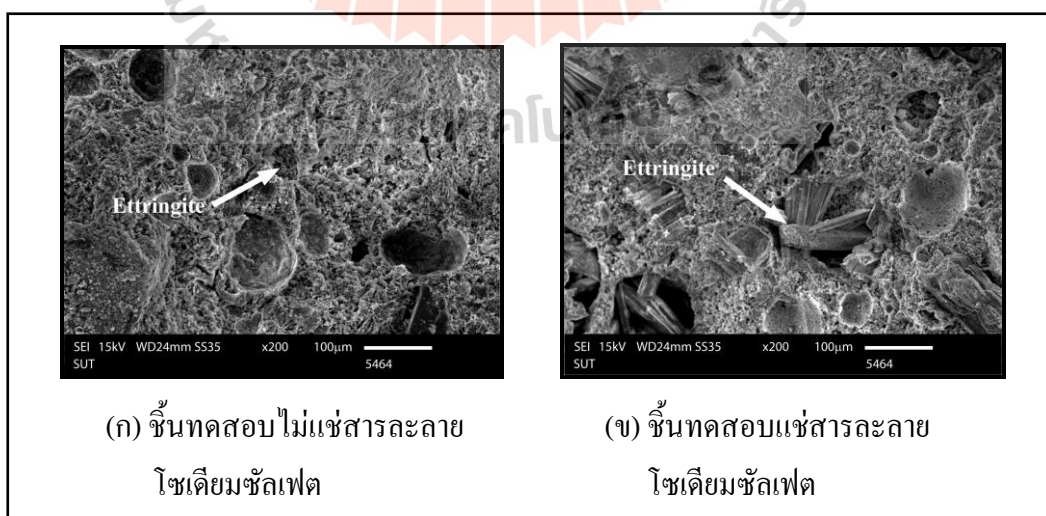
รูปที่ 4.25 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาแบบปกติ

ภาพถ่ายผิวการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,400 เท่า ของคอนกรีตมวลเบาโดยการเปรียบเทียบระหว่าง คอนกรีตมวลเบาผสมยิปซัมร้อยละ 30 ที่ไม่ใช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต แสดงดังรูปที่ 4.26 (ก) และที่ใส่สารละลายโซเดียมซัลเฟต และ 4.26 (ข) พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมยิปซัมร้อยละ 30 มีการเกิดเอ็ททริงไทต์ของชิ้นงานที่ไม่ใช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตและที่ใส่สารละลายโซเดียมซัลเฟตมีปริมาณของเอ็ททริงไทต์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.26 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 30

ในขณะที่ภาพถ่ายผิวการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า ของคอนกรีตมวลเบา รูปที่ 4.27 (ก) แสดงคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 100 ที่ไม่ได้แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต และ รูปที่ 4.27 (ข) แสดงคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 100 ที่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมที่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตมีขนาดของเอททริงไคต์ที่ใหญ่ขึ้นและมีปริมาณของเอททริงไคต์เพิ่มขึ้น (Hewlett PC, 1998)

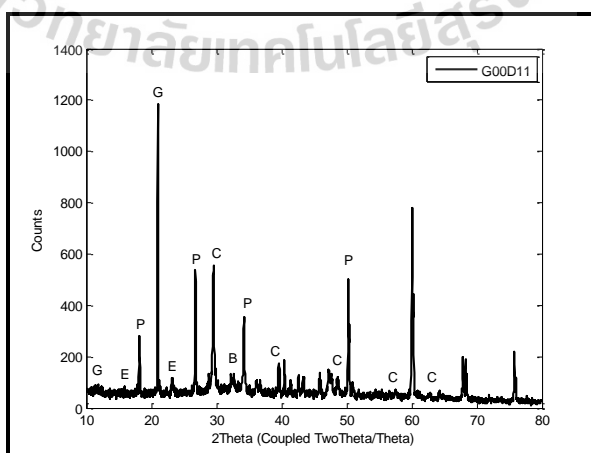


รูปที่ 4.27 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 100

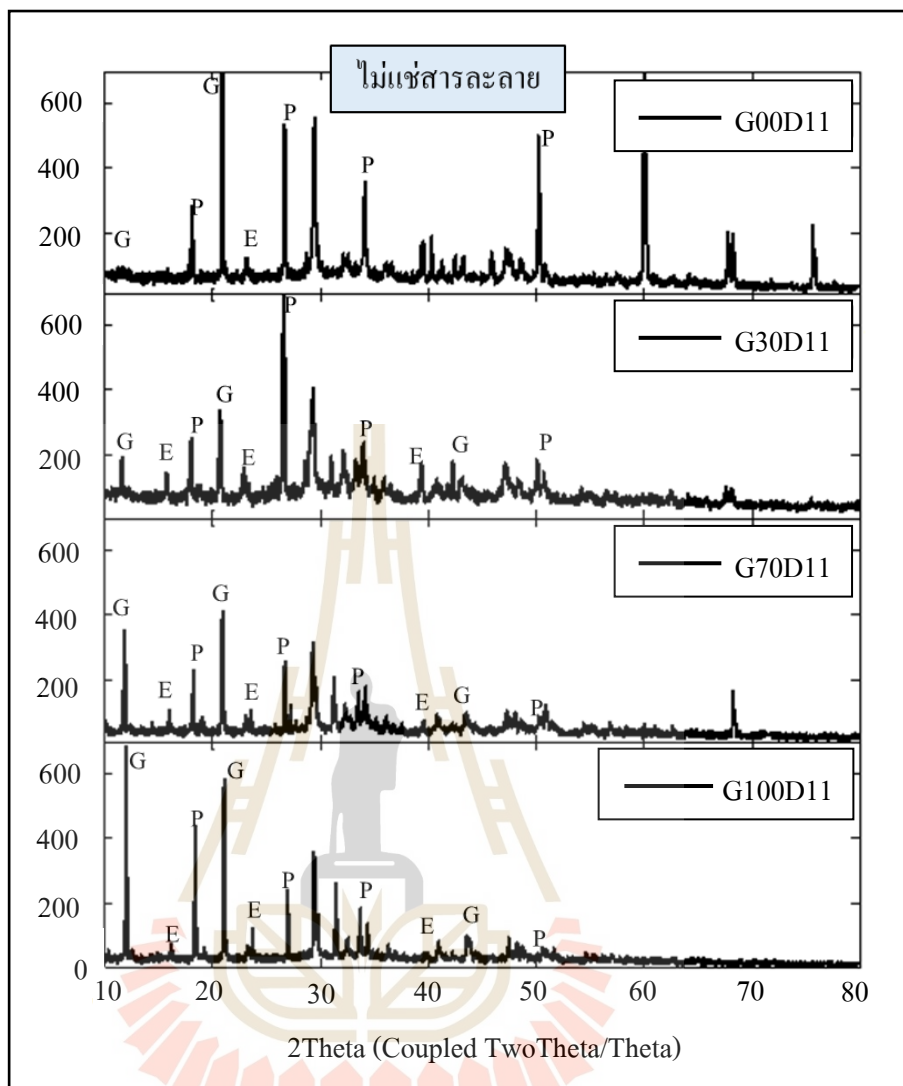
จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายผิวการแตกหักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัม อายุบ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ (รูปที่ 4.25 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ) พบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัม ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเศษยิปซัมและซีเมนต์เพสต์ เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่บริเวณผิวของเศษเม็ดยิปซัม หากปริมาณการแทนที่ของยิปซัมมีมากจนเกินไปจะทำให้เกิดผลึกเอ็ททริงไคต์มากขึ้น และเมื่อแช่ขึ้นทดสอบใน สารละลายโซเดียมซัลเฟต เอ็ททริงไคต์จะมีปริมาณมากขึ้น มีผลึกใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการ แตกร้าวของคอนกรีตมวลเบาได้

4.9 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

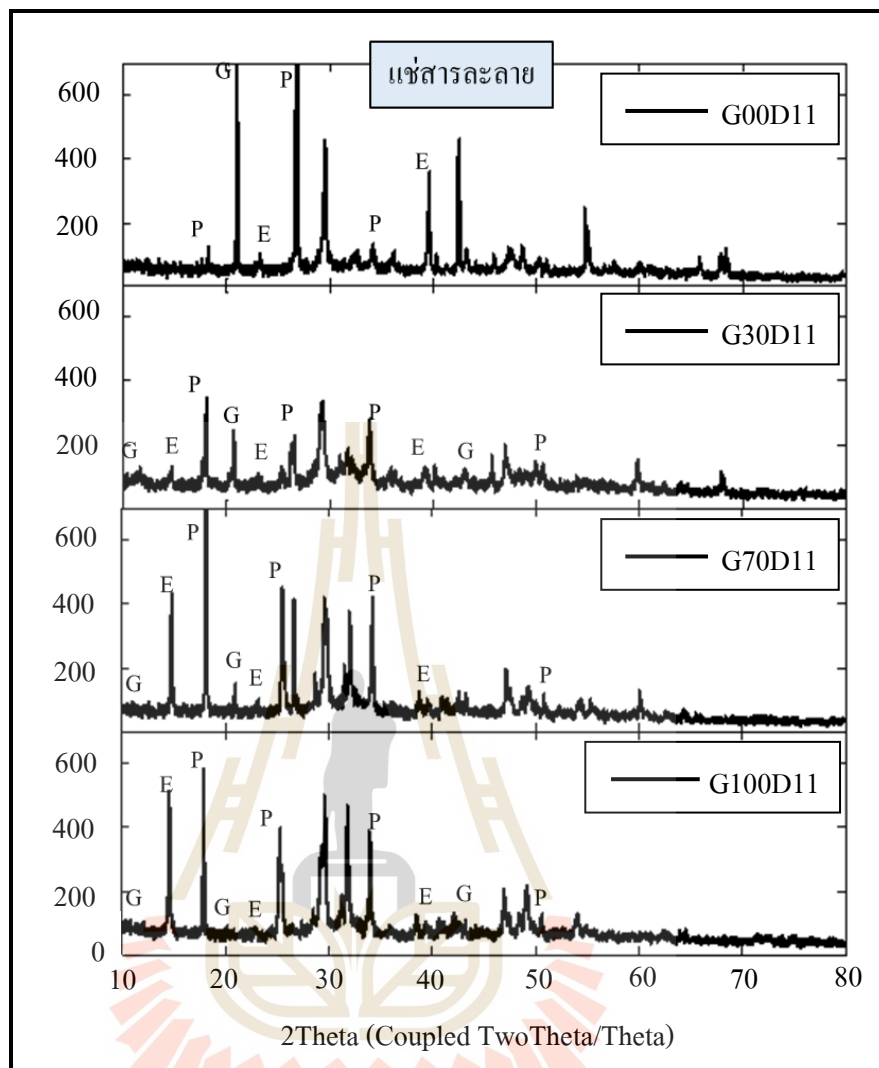
การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) ของคอนกรีตมวลเบาความ หนาแน่น 1,100 kg/m³ ที่คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 30 (G30D11), 70 (G70D11), และ 100 (G100D11) ของขึ้นทดสอบที่ไม่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตและที่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต เพื่อวิเคราะห์การเกิดผลึกของธาตุและการเกิดของเอ็ททริงไคต์ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอกซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่า พบว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (G00D11) มีการเกิดของผลึก แคลไซต์ (C), พอร์ตแลนด์ไดต์ (P), ยิปซัม (G), บราวน์มิลเลอร์ไรต์ (B) และ เอ็ททริงไคต์ (E) ซึ่งเอ็ททริงไคต์ที่พบมีปริมาณน้อย แสดงดังรูปที่ 4.28 ในรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30 แสดงภาพ Diffractogram ของขึ้นทดสอบที่ไม่แช่ สารละลายโซเดียมซัลเฟต และขึ้นทดสอบที่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ภาพ Diffractogram ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์



รูปที่ 4.29 ภาพ Diffractogram ของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 4.30 ภาพ Diffractogram ของคอนกรีตมวลเบาที่แฉะสารละลายโพลีเอทิลีนซัลเฟต

จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) ของคอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ที่คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 30 (G30D11), 70 (G70D11), และ 100 (G100D11) ของชั้นทดสอบที่ไม่แฉะสารละลายโพลีเอทิลีนซัลเฟตและที่แฉะสารละลายโพลีเอทิลีนซัลเฟต พบการเกิดผลึกของพอร์ตแลนด์ไคต์ (P), ยิปซัม (G), และ เอีททริงไคต์ (E) เป็นหลัก ซึ่งชั้นทดสอบที่ไม่ได้แฉะสารละลายโพลีเอทิลีนซัลเฟตพบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมเพิ่มขึ้นจะเห็นการเกิดของผลึกยิปซัม และผลึกของเอีททริงไคต์ และการลดลงของผลึกพอร์ตแลนด์ไคต์ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชั้นทดสอบที่ไม่แฉะสารละลายโพลีเอทิลีนซัลเฟตและที่แฉะสารละลายโพลีเอทิลีนซัลเฟต พบว่าชั้นทดสอบที่มีการแฉะสารละลายโพลีเอทิลีนซัลเฟตจะมีผลึกของเอีททริงไคต์

เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ใช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งจากรูปที่ 29 และ 30 การแทนที่ทรายด้วยยิปซัมร้อยละ 30 พบการเกิดของผลึกเอ็ททริงไคต์ไม่ต่างจากเดิมมาก จึงส่งผลให้การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 30 เกิดการขยายลดลง การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมร้อยละ 70 และ 100 มีการเกิดของผลึกเอ็ททริงไคต์เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมมากกว่าร้อยละ 30 จะเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้น และการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมร้อยละ 30 มีการเกิดของเอ็ททริงไคต์น้อยที่สุดเมื่อใส่สารละลายโซเดียมซัลเฟต ทำให้คอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมร้อยละ 30 มีการขยายตัวน้อยที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก การรวมตัวที่ดีของมวลคละ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างมวลคละเล็ก การเกิดของเอ็ททริงไคต์จึงมีโอกาศที่จะพัฒนาต่อยากกว่าอัตราส่วนผสมอื่น

จากผลการวิเคราะห์การเลี้ยงเบนริงส์เอกซ์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษยิปซัมอายุบ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ (รูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ) เพื่อวิเคราะห์การเกิดผลึกของธาตุและการเกิดของเอ็ททริงไคต์ โดยอาศัยหลักการเลี้ยงเบนของริงส์เอกซ์ ซึ่งการเกิดผลึกเอ็ททริงไคต์พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัมจะมีการเกิดผลึกเอ็ททริงไคต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น และในทางตรงกันข้ามการเกิดผลึกของพอร์ดแลนด์ไดต์จะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของยิปซัมเพิ่ม กล่าวคือการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมส่งผลให้เกิดผลึกเอ็ททริงไคต์มากขึ้นและลดการเกิดผลึกของพอร์ดแลนด์ไดต์ตามปริมาณการแทนที่ และการใส่สารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นการเร่งการขยายตัวของคอนกรีตโดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณและขนาดของเอ็ททริงไคต์ ส่งผลให้การขยายตัวจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับ การเกิดของเอ็ททริงไคต์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาอัตราส่วนผสมยิปซัมต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนซึ่งผลการศึกษสามารถสรุป

5.1.1 ผลกระทบจากปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเสยิปซัม

การแทนที่ทรายด้วยเสยิปซัมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกลดลงและค่อยๆ เพิ่มขึ้น หลังการแทนที่ทรายด้วยเสยิปซั่มมากกว่าร้อยละ 30 ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากเสยิปซั่มมีผิวขรุขระทำให้มีพื้นที่สำหรับยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์มีมากขึ้น การแทนที่ทรายด้วยเสยิปซั่มร้อยละ 5 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตน้อยที่สุด เนื่องจากปริมาณเสยิปซั่มที่น้อยเกินไป ส่งผลให้ขนาดคละของมวลรวมที่ดีลดลง และการเกิดของเอ็ททริงไคด์ตามรอยร้าวหรือตามขอบมุมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง และที่การแทนที่ทรายด้วยเสยิปซั่มร้อยละ 100 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เนื่องจากการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของซีเมนต์เพสต์มีมากขึ้น และการเกิดเอ็ททริงไคด์ในระยะก่อนตัวในช่วงต้นไม่ส่งผลให้เกิดการแตกร้าว ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น จากความสามารถในการดูดซึมน้ำของเสยิปซั่ม ส่งผลให้เมื่อปริมาณยิปซัมเพิ่มขึ้นการดูดซึมน้ำจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และยังคงส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่บริเวณผิวของเสยิปซั่มคือซีเมนต์เพสต์สามารถยึดเกาะบริเวณผิวของเสยิปซั่ม อีกทั้งการดูดซึมน้ำของเสยิปซั่มยังทำหน้าที่คล้ายสารลดน้ำพิเศษ ทำให้คอนกรีตมวลเบาผสมเสยิปซั่มมีการหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งการหน่วงการแข็งตัวของคอนกรีตมวลเบายังเป็นผลทำให้การเกิดช่องว่างในคอนกรีตลดลงการนำความร้อนของคอนกรีตจึงมากขึ้นตามปริมาณของยิปซัมเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตแน่นขึ้น และส่งผลให้ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิการะหว่าง Na_2O และ K_2O กับมวลรวมทรายลดลง ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตพบว่า คอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ทรายด้วยเสยิปซั่มจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยิปซัมเพิ่มขึ้น เนื่องจากยิปซัมทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตทำให้เกิดเอ็ททริงไคด์ ซึ่งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 2 เท่า ส่งผลให้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเกิดการแตกร้าวได้

5.1.2 ผลกระทบของการบ่ม

จากผลการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมด้วยการวิเคราะห์การขยายตัวจากการบ่ม โดยการห่อพลาสติกและการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าในการบ่มทั้ง 2 กรณี หากปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมนี้อัตราการเกิดเอ็ททริงไกด์จะมากขึ้นตามปริมาณการแทนที่ และจากการวิเคราะห์การบ่มโดยการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตและการบ่มโดยการห่อพลาสติก พบว่าการขยายตัวเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีมากกว่าการขยายตัวในสภาวะปกติ (ห่อพลาสติก) และเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษยิปซัมนี้อัตราการเกิดเอ็ททริงไกด์จะมากขึ้นตามไปด้วย และในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตการเกินของเอ็ททริงไกด์จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับการขยายตัวในสภาวะปกติ ซึ่งการเกิดเอ็ททริงไกด์จากการบ่มโดยการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตมีมากและมีผลึกใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตมวลเบาได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า องค์ความรู้ที่ได้ในการศึกษาอัตราส่วนผสมยิปซัมต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา จะสามารถใช้เป็นแนวทางการรีไซเคิลเศษยิปซัม โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์นี้ และจากการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยแนะนำคอนกรีตมวลเบาผสมเศษยิปซัม ที่สัดส่วนผสมรหัส G05D11 และ G05D13 สำหรับงานก่อผนังทั่วไปแบบไม่รับแรง (ฉาบปิดผิว) เพราะมีค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาแบบปกติ และเนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมาตรฐานเลขที่ มอก.2601-2556 ขณะที่สัดส่วนผสม G15D11 G30D11 G50D11 G70D11 G100D11 G15D13 G30D13 G50D13 G70D13 G100D13 สำหรับงานก่อผนังทั่วไปแบบไม่รับแรง (ไม่มีการฉาบปิดผิว) เพราะมีกำลังรับแรงอัดที่ผ่านมาตรฐาน มอก.2601-2556 แต่มีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบปกติมาก จึงไม่เหมาะกับงานฉาบปิดผิว และจากงานวิจัยนี้ได้กำหนดปริมาณน้ำคงที่ ในอนาคตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตามอัตราส่วนผสมยิปซัม ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น

รายการอ้างอิง

- คำภี จิตชัยภูมิ (2556). การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบา
เซลล์ล่า ผสมเถ้าลอยซีโอไลต์ธรรมชาติและนาโนซิลิกา. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- เฉลิมชัย ไชยธรรมรัตน์ (2559). ผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มมาลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต
มวลเบา. สาขาวิชาเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ชยันต์ พิเชียรสุนทร และ วิเชียร จีรวงศ์ (2556). คู่มือเกณฑ์กรรมแผนไทยเล่ม 4 เครื่องยาธาตุวัตถุ. อัม
รินทร์ปริ๊ตติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. หน้า 17
- มยุรี ปาลวงศ์ (2552). ประโยชน์ของยิปซัม. กลุ่มงานเผยแพร่และอำนวยความสะดวก สำนักบริหารกลาง กรม
อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1
- สรารุช เจริญศิริเสถียร (2552). คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงเถ้าหินปูนจากอุตสาหกรรมผลิตปูน
ขาว. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- ASTM C33/C33M-13 (2013). **Standard Specification for Concrete Aggregates**. Annual Book of
ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C109/C109M-13 (2013). **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic
Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube specimens)**. Annual Book of ASTM
Standards. Philadelphia.
- ASTM C150/C150M-15 (2015). **Standard specification for portland cement**. Annual Book of
ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C157/C157M-08 (2014). **Standard Test Method for Length Change of Hardened
Hydraulic-Cement and Concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C490/C490M-11 (2014). **Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination
of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete**¹. Annual Book
of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C495/C495M-12 (2012). **Standard Test Method for Compressive Strength of
Lightweight Insulating Concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.

- ASTM C796/C796M (2012). **Standard specification for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam.** Annual Book of ASTM Standards. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM D6489-99 (2012). **Standard Test Method for Determining the Water Absorption of Hardened Concrete Treated With a Water Repellent Coating.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM E1225-13 (2013). **Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids Using the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique.** Annual Book of ASTM Standards. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- Gustavo Tovar-Rodríguez , Marilda Barra, Sergio Pialarissi, Diego Aponte, Enric Vázquez (2012). **Expansion of mortars with gypsum contaminated fine recycled aggregates.** Construction and Building Materials, vol. 38, pp. 1211-1220, 2013.
- Hewlett PC (1998). **LEA'S Chemistry of Cement and Concrete.** 4th cd. London: Arnold.
- Mehmet Gesoglu , Erhan Güneyisi , Ali H. Nahhab , Halit YAZICI (2016). **The effect of aggregates with high gypsum content on the performance of ultra-high strength concretes and Portland cement mortars.** Construction and Building Materials, vol. 110, pp. 346-354, 2016.
- M.J. Gazquez , J.P. Bolivar , F. Vaca , R. García-Tenorio , A. Caparros (2012). **Evaluation of the use of TiO₂ industry red gypsum waste in cement production.** Cement and Concrete Composites, vol. 37, pp 76-81, 2013.
- Mridul Garg , Neeraj Jain (2010). **Waste gypsum from intermediate dye industries for production of building materials.** Construction and Building Materials, vol. 24, pp 1632-1637, 2010.
- Philip Zak , Taha Ashour , Azra Korjenic , Sinan Korjenic , Wei Wua (2015). **The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials.** Construction and Building Materials, vol. 106, pp 179-188, 2016.
- Xiao Lu Guo, Hui Sheng Shi (2007). **Thermal treatment and utilization of flue gas desulphurization gypsum as an admixture in cement and concrete.** Construction and Building Materials, vol. 22, pp. 1471-1476, 2008.



ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดสอบ

ตารางที่ ก.1 การดูดซึมน้ำของเศษยิปซัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 40
วันที่ทดสอบ 20/6/2559

Flask No.	สัญลักษณ์	1	2
ปริมาตรของ Flask	V	500	500
น.น.เศษยิปซัม (g)	B	500.16	500.06
น.น.Flask + เศษยิปซัม (sat.surf.day) + น.น.น้ำ	C	796.87	792.71
น.น.ถาดที่ใช้อบแห้ง (g)		147.2	146.9
น.น.ถาดที่ใช้อบแห้ง + น.น.ยิปซั่ม อบแห้ง (g)		643.37	643.84
น.น.ยิปซั่มอบแห้ง	A	496.17	496.94
น.น.Flask + น.น.น้ำ (g)	D	666.19	664.54
Bulk specific gravity	$A/(B+D-C)$	1.34	1.34
Bulk specific gravity (ssd)	$B/(B+D-C)$	1.35	1.34
Apparent specific gravity	$A/(D+A-C)$	1.36	1.35
Percent Absorption	$(B-A)/A*100$	0.80	0.63

วัสดุ : เศษชิปซัม

วันที่ทดสอบ 21/6/2559

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างที่ 1 ชิปซัมที่ยังไม่ผ่านการร่อน น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 502 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้าง + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้างบน ตะแกรง (g)	% ที่ค้าง บนตะ แกรง	% ที่ค้าง สะสม บน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	509	509	0	0	0.0	99.43
8	2.36	488.51	488.51	0	0	0.0	98.35
16	1.18	303.23	391.51	88.28	17.59	17.6	97.97
30	0.6	388.76	463.83	75.07	14.95	32.5	89.86
50	0.3	550.05	733.91	183.86	36.63	69.2	24.01
100	0.15	343.81	479.61	135.8	27.05	96.2	4.14
ถัด		490.76	508.88	18.12	3.61	99.8	-0.01
รวม		3074.12	3575.25	501.13	99.83		

Fineness Modulus = 3.15

วัสดุ : เศษชิปซัม

วันที่ทดสอบ 21/6/2559

ตารางที่ ก.3 ตัวอย่างที่ 2 ชิปซัมที่ยังไม่ผ่านการร่อน น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.72 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้าง + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้างบน ตะแกรง (g)	% ที่ค้าง บนตะ แกรง	% ที่ค้าง สะสม บน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	509	511.9	2.9	0.58	0.58	98.70
8	2.36	486.4	491.6	5.2	1.04	1.62	97.66
16	1.18	414.1	425.1	11	2.20	3.81	95.46
30	0.6	388.8	412.7	23.9	4.77	8.59	90.69
50	0.3	550.6	934.7	384.1	76.71	85.30	13.98
100	0.15	344	378.2	34.2	6.83	92.13	7.15
ถัด		490.9	526.7	35.8	7.15	99.28	0.55
รวม		3183.8	3680.9	497.1	99.28		

Fineness Modulus = 2.91

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วัสดุ : เศษชิปซัม

วันที่ทดสอบ 21/6/2559

ตารางที่ ก.4 ตัวอย่างที่ 3 ชิปซัมที่ยังไม่ผ่านการร่อน น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.57 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้าง + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้างบน ตะแกรง (g)	% ที่ค้าง บนตะ แกรง	% ที่ค้าง สะสม บน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	509	511.5	2.5	0.50	0.50	98.91
8	2.36	486.5	492.71	6.21	1.24	1.74	98.01
16	1.18	414.2	424.4	10.2	2.04	3.78	95.25
30	0.6	388.8	416.2	27.4	5.47	9.25	89.06
50	0.3	550.4	936.8	386.4	77.19	86.44	21.04
100	0.15	343.9	369.9	26	5.19	91.64	8.85
ถัด		490.8	531.2	40.4	8.07	99.71	0.00
รวม		3183.6	3682.71	499.11	99.71		

Fineness Modulus = 2.93



วัสดุ : เศษยิปซัม

วันที่ทดสอบ 22/6/2559

ตารางที่ ก.5 ตัวอย่างที่ 4 ยิปซัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 40

น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.8 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้าง + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้างบน ตะแกรง (g)	% ที่ค้าง บนตะ แกรง	% ที่ค้าง สะสม บน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	487.7	489.7	2	0.40	0.40	99.40
8	2.36	471.1	476.5	5.4	1.08	1.48	98.32
16	1.18	397.9	399.8	1.9	0.38	1.86	97.94
30	0.6	376.5	417.1	40.6	8.11	9.96	89.84
50	0.3	524.7	854.5	329.8	65.85	75.82	23.98
100	0.15	329.6	429.1	99.5	19.87	95.69	4.11
ถัด		475.8	496.4	20.6	4.11	99.80	0.00
รวม		3063.3	3563.1	499.8	99.80	285.00	

Fineness Modulus = 2.85



วัสดุ : เศษยิปซัม

วันที่ทดสอบ 22/6/2559

ตารางที่ ก.6 ตัวอย่างที่ 5 ยิปซัมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 40

น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.72 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้าง + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้างบน ตะแกรง (g)	% ที่ค้าง บนตะ แกรง	% ที่ค้าง สะสม บน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	509	511	2	0.40	0.40	98.70
8	2.36	486.5	491	4.5	0.90	1.30	97.66
16	1.18	414.2	428	13.8	2.76	4.06	95.46
30	0.6	388.7	419.7	31	6.19	10.25	90.96
50	0.3	550.5	891	340.5	68.02	78.27	13.98
100	0.15	343.9	404.9	61	12.19	90.46	7.15
ถัด		490.8	535.1	44.3	8.85	99.31	0.00
รวม		3183.6	3680.7	497.1	99.31		

Fineness Modulus = 2.91



วัสดุ : เศษชิปซัม

วันที่ทดสอบ 23/6/2559

ตารางที่ ก.7 ตัวอย่างที่ 6 ทราบ:ชิปซัม (70:30)

น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.8 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้าง + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้างบน ตะแกรง (g)	% ที่ค้าง บนตะ แกรง	% ที่ค้าง สะสม บน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	509	509	0	0.00	0.00	99.82
8	2.36	486.6	486.7	0.1	0.02	0.02	90.80
16	1.18	414.2	450.5	36.3	7.25	7.27	92.55
30	0.6	388.7	435.2	46.5	9.29	16.55	83.27
50	0.3	550.3	704.2	153.9	30.73	47.28	52.54
100	0.15	343.8	554.1	210.3	41.99	89.28	10.54
pan		490.8	543.6	52.8	10.54	90.24	0.00
sum		3183.4	3635.3	451.9	90.24		

Fineness Modulus = 2.60



วัสดุ : เศษชิปซัม

วันที่ทดสอบ 23/6/2559

ตารางที่ ก.8 ตัวอย่างที่ 7 ทราบ:ชิปซัม (50:50)

น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 501.1 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้าง + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้างบน ตะแกรง (g)	% ที่ค้าง บนตะ แกรง	% ที่ค้าง สะสม บน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	509	509	0	0.00	0.00	97.43
8	2.36	486.3	486.5	0.2	0.04	0.04	97.39
16	1.18	414	414.3	0.3	0.06	0.10	97.33
30	0.6	388.5	416.3	27.8	5.55	5.65	91.78
50	0.3	550.3	727.4	177.1	35.34	40.99	56.44
100	0.15	343.8	574.3	230.5	46.00	86.99	10.44
pan		490.8	543.1	52.3	10.44	97.43	0.00
sum		3182.7	3670.9	488.2	97.43		

Fineness Modulus = 2.31



วัสดุ : เศษชิปซัม

วันที่ทดสอบ 23/6/2559

ตารางที่ ก.9 ตัวอย่างที่ 8 ทราเย:ชิปซัม (30:70)

น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้าง + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ ค้างบน ตะแกรง (g)	% ที่ค้าง บนตะ แกรง	% ที่ค้าง สะสม บน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	509	509	0	0.00	0.00	97.52
8	2.36	486.5	487.1	0.6	0.12	0.12	97.40
16	1.18	414.2	414.4	0.2	0.04	0.16	97.36
30	0.6	388.6	407.5	18.9	3.77	3.93	93.59
50	0.3	550.3	844.8	294.5	58.81	62.74	34.78
100	0.15	343.7	478.2	134.5	26.86	89.60	7.93
pan		490.8	530.5	39.7	7.93	97.52	0.00
sum		3183.1	3671.5	488.4	97.52		

Fineness Modulus = 2.54



ตารางที่ ก.10 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ชั้นทดสอบ	ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m ³)	อายุบ่มเฉลี่ย (MPa)			
		7 (วัน)	14 (วัน)	28 (วัน)	60 (วัน)
G00D11	1,125.72	2.60	3.26	3.69	3.78
G05D11	1,091.26	2.25	2.58	4.57	4.62
G15D11	1,120.88	2.16	2.64	2.83	3.32
G30D11	1,168.60	2.38	2.61	2.80	3.13
G50D11	1,170.56	2.41	2.65	2.74	4.42
G70D11	1,165.52	2.77	2.71	2.96	3.02
G100D11	1,180.00	4.70	4.94	5.01	6.30
G00D13	1,374.87	4.45	6.18	6.94	7.21
G05D13	1,341.77	3.75	4.01	5.56	8.98
G15D13	1,386.22	3.79	3.95	4.37	5.60
G30D13	1,370.01	4.49	4.61	5.34	5.73
G50D13	1,372.53	4.69	4.87	5.58	7.05
G70D13	1,366.72	4.30	4.56	4.58	5.51
G100D13	1,348.80	5.31	5.43	6.07	7.93

ตารางที่ ก.11 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ชนิดทดสอบ	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย
G00D11	20.55	24.81	23.11	22.82
G05D11	22.11	22.41	23.99	22.84
G15D11	28.76	30.68	28.82	29.42
G30D11	33.15	32.3	36.44	33.96
G50D11	29.47	33.84	33.63	32.31
G70D11	33.04	32.49	36.05	33.86
G100D11	34.42	34.82	30.57	33.27
G00D13	16.46	16.45	16.54	16.48
G05D13	18.81	16.28	19.11	18.07
G15D13	23.88	23.62	23.64	23.71
G30D13	26.64	27.91	29.18	27.91
G50D13	35.4	27.66	28.69	30.58
G70D13	29.4	32.32	32.9	31.54
G100D13	34.24	28.22	30.45	30.97

ตารางที่ ก.12 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ชนิดทดสอบ	การนำความร้อน (W/m.°K)		ค่าเฉลี่ย
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	
G00D11	0.068	0.066	0.067
G05D11	0.07	0.067	0.0685
G15D11	0.071	0.072	0.0715
G30D11	0.07	0.077	0.0735
G50D11	0.08	0.075	0.0775
G70D11	0.082	0.084	0.083
G100D11	0.088	0.087	0.0875
G00D13	0.079	0.076	0.0775
G05D13	0.099	0.095	0.097
G15D13	0.105	0.108	0.1065
G30D13	0.111	0.12	0.1155
G50D13	0.121	0.114	0.1175
G70D13	0.129	0.118	0.1235
G100D13	0.134	0.131	0.1325

ตารางที่ ก.13 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³

ชนิดทดสอบ	ชั้นที่	การหดตัว (mm)				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
G00D11	1	8.382	8.280	8.250	8.130	8.100
	2	5.554	5.458	5.424	5.284	5.246
	3	10.317	10.314	10.230	10.226	10.124
	เฉลี่ย	8.084	8.017	7.968	7.880	7.823
G05D11	1	5.190	5.168	5.158	5.034	5.032
	2	6.372	6.340	6.250	6.184	6.174
	3	7.284	7.282	7.212	7.076	7.108
	เฉลี่ย	6.282	6.263	6.207	6.098	6.105
G15D11	1	6.012	6.010	6.004	5.958	5.954
	2	6.456	6.440	6.391	6.364	6.360
	3	6.826	6.620	6.615	6.612	6.609
	เฉลี่ย	6.431	6.357	6.337	6.311	6.308
G30D11	1	6.016	5.994	5.958	5.932	5.914
	2	6.770	6.758	6.748	6.712	6.704
	3	7.192	7.170	7.140	7.130	7.124
	เฉลี่ย	6.659	6.641	6.615	6.591	6.581
G50D11	1	5.732	5.696	5.692	5.650	5.642
	2	4.742	4.732	4.728	4.702	4.676
	3	3.136	3.108	3.101	3.098	3.091
	เฉลี่ย	4.537	4.512	4.507	4.483	4.470
G70D11	1	4.376	4.304	4.292	4.281	4.274
	2	5.382	5.290	5.011	4.919	4.908
	3	5.096	5.094	5.078	5.070	5.056
	เฉลี่ย	4.951	4.896	4.794	4.757	4.746

ตารางที่ ก.13 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ (ต่อ)

ชนิดทดสอบ	ชั้นที่	การหดตัว (mm)				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
G100D11	1	6.558	6.556	6.544	6.504	6.491
	2	5.404	5.400	5.398	5.366	5.360
	3	5.026	5.023	5.019	5.010	4.948
	เฉลี่ย	5.663	5.660	5.654	5.627	5.600

ตารางที่ ก.14 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³

ชนิดทดสอบ	ชั้นที่	การหดตัว (mm)				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
G00D13	1	6.378	6.336	6.248	6.194	6.110
	2	4.916	4.836	4.784	4.746	4.672
	3	6.012	6.004	5.626	5.620	5.596
	เฉลี่ย	5.769	5.725	5.553	5.520	5.459
G05D13	1	8.784	8.776	8.764	8.744	8.666
	2	8.394	8.374	8.368	8.346	8.284
	3	6.862	6.851	6.844	6.816	6.764
	เฉลี่ย	8.013	8.000	7.992	7.969	7.905
G15D13	1	7.366	7.334	7.304	7.298	7.264
	2	7.090	7.050	7.046	7.038	7.024
	3	5.658	5.648	5.588	5.575	5.568
	เฉลี่ย	6.705	6.677	6.646	6.637	6.619
G30D13	1	5.866	5.812	5.809	5.801	5.798
	2	6.370	6.314	6.308	6.284	6.272
	3	6.526	6.486	6.477	6.434	6.390
	เฉลี่ย	6.254	6.204	6.198	6.173	6.153

ตารางที่ ก.14 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ (ต่อ)

ชนิดทดสอบ	ชั้นที่	การหดตัว (mm)				
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
G50D13	1	4.401	4.398	4.394	4.338	4.330
	2	5.360	5.347	5.344	5.316	5.292
	3	7.648	7.612	7.608	7.594	7.586
	เฉลี่ย	5.803	5.786	5.782	5.749	5.736
G70D13	1	6.330	6.324	6.308	6.303	6.294
	2	3.402	3.398	3.387	3.378	3.354
	3	3.421	3.416	3.411	3.407	3.368
	เฉลี่ย	4.384	4.379	4.369	4.363	4.339
G100D13	1	5.638	5.625	5.616	5.500	5.490
	2	6.726	6.676	6.662	6.596	6.580
	3	5.358	5.346	5.337	5.314	5.290
	เฉลี่ย	5.907	5.882	5.872	5.803	5.787



ตารางที่ ก.15 การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ชนิดทดสอบ	การขยายตัวในสารละลาย โซเดียมซัลเฟต	การขยายตัวใน สภาวะปกติ	% ความ แตกต่าง
G00D11	-4.842	-4.737	-2.17
G05D11	7.649	5.930	22.48
G15D11	4.982	4.246	14.79
G30D11	4.140	4.070	1.69
G50D11	6.667	6.561	1.58
G70D11	8.772	8.386	4.40
G100D11	10.316	9.439	8.50
G00D13	-6.105	-5.684	-6.90
G05D13	5.404	4.456	17.53
G15D13	3.439	2.912	15.31
G30D13	2.737	2.702	1.28
G50D13	3.649	3.509	3.85
G70D13	5.474	4.982	8.97
G100D13	6.035	5.158	14.53

ประวัติผู้เขียน

นางสาววันวิสาข์ ศิริสวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม 2535 จังหวัดนครพนม ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษา ที่โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2557

หลังจากสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ. 2557 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ณ สถาบันการศึกษาเดิม ขณะศึกษาระดับปริญญาโท ผู้วิจัยได้เป็นผู้สอน ในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต จากที่มีประสบการณ์ด้านการสอนปฏิบัติการและการทำงานวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความชำนาญทางด้านสมบัติของวัสดุเป็นอย่างดี โดยเฉพาะวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์และยิปซัม

