



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาบล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาโดยการผสมฝุ่นจากเตาเผาปูนขาว-ผลพลอยได้จาก
กากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

DEVELOPMENT OF LIGHT WEIGHT CONCRETE GLASS BLOCK MADE FROM
LIME KILN DUST-BY PRODUCTS OF PAPER MANUFACTURING INDUSTRY

ดร. วีระศักดิ์ ละอองจันทร์

นายอมเรศ บกสุวรรณ

ดร. หมีง จิ่ง

นายนิติ วิทยาวิโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาบล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาโดยการผสมฝุ่นจากเตาเผาปูนขาว-ผลพลอยได้จาก

ภาคอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

DEVELOPMENT OF LIGHT WEIGHT CONCRETE GLASS BLOCK MADE FROM

LIME KILN DUST-BY PRODUCTS OF PAPER MANUFACTURING INDUSTRY

โดย

ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ หัวหน้าโครงการ

นายอมเรศ บกสุวรรณ ผู้ร่วมวิจัย

ดร.หมีง จิ่ง ผู้ร่วมวิจัย

นายนิติ วิทยาวิโรจน์ ผู้ร่วมวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี 2553

ส่วนที่ 1 รายละเอียดโครงการ

1.ชื่อโครงการวิจัย การพัฒนาบล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาโดยการผสมฝุ่นจากเตาเผาปูนขาว-ผลพลอยได้จากกากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

DEVELOPMENT OF LIGHT WEIGHT CONCRETE GLASS BLOCK MADE
FROM LIME KILN DUST-BY PRODUCTS OF PAPER MANUFACTURING INDUSTRY

2.หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบงานวิจัยและสถานที่ตั้งพร้อมทั้งชื่อหน่วยงาน ลักษณะของการ
ร่วมงานวิจัยกับหน่วยงานอื่น (ถ้ามี)

หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-3410 โทรสาร 0-2549-3412

3.คณะผู้วิจัย บทบาทของนักวิจัยแต่ละคนในการทำวิจัยและสัดส่วนที่ทำการวิจัย (%)

หัวหน้าโครงการ (วางแผนงาน, ควบคุมงานวิจัย, วิเคราะห์ และสรุปผล)

ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ สัดส่วนที่ทำวิจัย 65 %

ผู้ร่วมงานวิจัย (ดำเนินงานวิจัย, วิเคราะห์ผล และถ่ายทอดเทคโนโลยี)

นายอมเรศ บกสุวรรณ สัดส่วนที่ทำวิจัย 15 %

ดร.หมีง จิ่ง สัดส่วนที่ทำวิจัย 10 %

นายนิติ วิทยาวิโรจน์ สัดส่วนที่ทำวิจัย 10 %

4.ประเภทของการวิจัย การพัฒนาทดลอง (experimental development)

5.สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

กลุ่มวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีพื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์

ส่วนที่ 2 เนื้อหาโครงการ

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตกระดาษก่อให้เกิดกากอุตสาหกรรมจำนวนมากจึงเป็นที่มาของการจัดงานวิจัยนี้ขึ้นมาโดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษานำกากปูนขาวจากโรงงานผลิตกระดาษมาใช้ในงานบล็อกคอนกรีตและนำบล็อกแก้วมาแทนที่ในเนื้อบล็อกคอนกรีตมวลเบา ซึ่งในส่วนการออกแบบส่วนผสมนี้จะใช้กากปูนขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 และ 0.6 ใช้ปริมาณผงอลูมิเนียมร้อยละ 1 จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของบล็อกมวลเบา ซึ่งทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่น การทดสอบการดูดซึมน้ำ การทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้มอร์ตาร์ดาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร และกำลังรับแรงดัดโดยใช้มอร์ตาร์ดาร์ขนาด $4 \times 4 \times 4$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จากการทดสอบพบว่าเมื่อผสมกากปูนขาวร้อยละ 10 จะมีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดสูงที่สุด ส่วนค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณกากปูนขาวและพบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณกากปูนขาวที่เพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบต่างๆจะมีค่าเทียบเท่ากับมาตรฐานตาม มอก.1505-2541 ชั้นคุณภาพที่ 4

โดยในส่วนการนำบล็อกแก้วแทนที่ในเนื้อบล็อกคอนกรีตมวลเบาจะแทนที่ ร้อยละ 0 , 25 , 50 , 75 และ 100 โดยพื้นที่คอนกรีตมวลเบา ตามลำดับ จากการทดสอบหาค่าคุณสมบัติสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) JIS R 2618 และค่าการทนไฟพบว่าเมื่อผสมปริมาณกากปูนขาวร้อยละ 10 จะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด ส่วนค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณกากปูนขาวและพบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณกากปูนขาวที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบต่างๆ จะมีค่าเทียบเท่ากับมาตรฐานตาม มอก.1505-2541 ชั้นคุณภาพที่ 2 รวมทั้งการเสริมบล็อกแก้วในส่วนร้อยละ 75 จะเป็นการเสริมที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีความเป็นฉนวนของเนื้อคอนกรีตมวลเบารวมอยู่ด้วยและตรงตามมาตรฐานแสงสว่างผ่านบล็อกแก้ว

คำสำคัญ บล็อกมวลเบา แก้วจากเตาเผากากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ผงอลูมิเนียม

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ ทดสอบต่างๆ และงบประมาณประจำปี 2553 ที่ใช้สำหรับเป็นค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัยใน โครงการโดยตลอดจนโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ ประสาทวิชาความรู้ต่างๆอย่างมากมายหลายด้าน ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถนำความรู้เหล่านั้นมาใช้ ประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป โดยขอขอบคุณของโครงการนี้ทั้งหมด ให้แก่ผู้ที่มีพระคุณทุกท่านที่ช่วยส่งเสริมให้งานวิจัยนี้ สำเร็จขึ้นมาได้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 บล็อกมวลเบา	12
2.3 คุณสมบัติของบล็อกมวลเบา	14
2.4 ปูนซีเมนต์	17
2.5 ทฤษฎี	21
2.6 อลูมิเนียม	22
2.7 น้ำ	23

2.8	ได้จากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	23
2.9	บล็อกแก้ว	30
2.10	คุณสมบัติบล็อกแก้ว	30
บทที่ 3	วิธีดำเนินงาน	32
3.1	แผนการดำเนินงาน	32
3.2	เครื่องมือ	35
3.3	ขั้นตอนการดำเนินงาน	43
3.4	วิธีการทดสอบ	44
บทที่ 4	ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	48
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติของบล็อกมวลเบา	48
4.2	การวิเคราะห์/การวิจารณ์	69
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	72
5.1	สรุป	72
5.2	ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม		74
ภาคผนวก ก		77
	องค์ประกอบทางเคมีของกากปูนขาวในรูปแบบของแข็งและส่วนที่ละลาย น้ำและการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวและได้จาก เตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	
ภาคผนวก ข		79
	มาตรฐานการทดสอบการทนไฟวัสดุป้องกันการลามไฟ	

ภาคผนวก ก

81

รูปวิธีการทำและขั้นตอนการทดสอบ

ภาคผนวก ง

100

กฎกระทรวง



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ระยะเวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นร้อยละ 80 ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด	21
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของกากปูนขาวในรูปของแข็งและส่วนที่ละลายน้ำ	29
2.3	การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวและเถ้าจากเตาเผากากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	30
3.1	อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์	34
3.2	อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าจากเตาเผา	34
3.3	อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ระหว่างปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียม	35
3.4	อัตราการเพิ่มแรงอัด	45
4.1	กำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียม	49
4.2	กำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับเถ้าจากเตาเผาอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	50
4.3	ความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียม	53
4.4	ความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับเถ้าจากเตาเผาอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	54
4.5	ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียม	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.6	ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับเถ้า จากเตาเผากากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	58
4.7	ค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังอาคาร	64
4.8	ค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังอาคารและการส่องผ่านแสง	65
4.9	การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของส่วนผสม LL3กับมาตรฐาน มอก. 1505-2541	71



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	บล็อกแก้ว	31
3.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	35
3.2	ทรายหยาบร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30	36
3.3	เถ้าจากเตาเผากากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	36
3.4	ผงอลูมิเนียม	37
3.5	บล็อกแก้ว ขนาด 19x19x7.5 ซม.	37
3.6	ผงยิปซัม	38
3.7	น้ำประปา	38
3.8	ตาข่าย	39
3.9	เครื่องผสมบล็อก	39
3.10	แบบหล่อขนาด 5×5×5 ซม.	40
3.11	แบบหล่อขนาด 7.5x 15x 15 ซม.	40
3.12	แบบหล่อขนาด 7.5x30x30 ซม.(2ก้อน)	41
3.13	เครื่องทดสอบกำลังอัด	41
3.14	เครื่องสว่านแท่น	42
3.15	เครื่องเลื่อยฉลุไฟฟ้า (จิ๊กซอว์)	42
3.16	เตาเผาชนิดเตาแก๊ส	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับร้อยละพองอะลูมิเนียม	51
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับร้อยละเถ้าจากเตาเผากาก อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	52
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับร้อยละพองอะลูมิเนียม	55
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับร้อยละเถ้าจากเตาเผา กากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	56
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำกับร้อยละเถ้าจากเตาเผากาก อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	59
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำกับร้อยละเถ้าจากเตาเผากาก อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ	60
4.7	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	62
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนกับการเพิ่มบล็อกแก้ว	64
4.9	การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 0	66
4.10	การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 25	66
4.11	การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 50	67
4.12	การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 75	67
4.13	การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 100	68
4.14	ความสัมพันธ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา	69

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันบดล็อกมวลเบาเป็นวัสดุก่อสร้างที่กำลังเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย แต่ในประเทศไทยยังไม่มีผลิตภัณฑ์บดล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาซึ่งในต่างประเทศได้มีการผลิตผลิตภัณฑ์บดล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาออกมาใช้แล้วอย่างแพร่หลายในต่างประเทศซึ่งผลิตภัณฑ์นี้จะทำให้ง่ายต่อการทำงานก่อสร้างไม่ต้องทำหลายขั้นตอนซึ่งจะทำให้งานล่าช้าได้

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตบดล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาและจัดจำหน่ายในเชิงอุตสาหกรรมจะเป็นเทคโนโลยีของต่างประเทศทั้งสิ้น ซึ่งรวมถึงวัตถุดิบบางประเภทด้วย ส่งผลให้ราคาผลิตภัณฑ์บดล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบามีราคาสูง จึงเป็นข้อจำกัดในการส่งเสริมการใช้งานบดล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาภายในประเทศไทย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันรัฐบาลของประเทศไทยมีนโยบายให้คนในชาติร่วมกันประหยัดพลังงานและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้น อีกทั้งหน่วยงานส่งเสริมการวิจัยของภาครัฐมุ่งเน้นส่งเสริมงานวิจัยเชิงพาณิชย์ และงานวิจัยเชิงแก้ปัญหาให้กับภาคอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น ประกอบกับนิคมอุตสาหกรรม 304 อำเภอปิ่นทองบุรี จังหวัดปราจีนบุรี มีอุตสาหกรรมผลิตกระดาษขนาดใหญ่ มีกำลังการผลิตกระดาษประมาณ 580,000 ตันต่อปี [1] และกระบวนการผลิตกระดาษนี้ก่อให้เกิดผลพลอยได้ (By-Product) หรือกากอุตสาหกรรมจำนวนมาก โดยอยู่ในรูปของกากอุตสาหกรรมที่ไม่อันตรายแต่เป็นภาระและค่าใช้จ่ายที่บริษัทจะต้องลงทุนกำจัดของเสียเหล่านี้ทิ้งไป จึงได้เกิดแนวคิดของการวิจัยที่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับกากอุตสาหกรรมซึ่งจะนำกากอุตสาหกรรมนี้ทำเป็นเฟรมของบดล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของบดล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาซึ่งได้พัฒนาจากงานวิจัยบดล็อกมวลเบาผสมกากปูนขาวผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมกระดาษงานวิจัยนี้จะเน้นกระบวนการผลิตบดล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาแบบต้นทุนต่ำ มีกรรมวิธีการผลิตไม่ซับซ้อน กลุ่มประชาชนระดับรากหญ้าสามารถทำการผลิตได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้จีอีถ้าส่วนผสมของฝุ่นจากเตาเผาปูนขาวในกระบวนการผลิตน้ำดื่มเชื้อ จัดเป็นกากอุตสาหกรรมหรือผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระดาษ เพื่อใช้ในงานก่อสร้างประเภทผนังก่อบนดินไม่รับน้ำหนักเพื่อลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าภายในอาคาร

1.2.2 เพื่อทราบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน ของวัสดุฉนวนก่อบนดินที่ทำมาจากกากอุตสาหกรรมร่วมกับบล็อกแก้วในสัดส่วนที่เหมาะสม

1.2.3 เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับกากอุตสาหกรรมและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

1.2.4 เพื่อผลิตนวัตกรรมชนิดใหม่ที่มีจุดประสงค์ในการประหยัดการใช้ไฟฟ้าภายในอาคาร และเพิ่มความสวยงามให้กับผนังของอาคาร โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตกระดาษร่วมกับบล็อกแก้ว

1.3 ขอบเขต

1.3.1 หาสัดส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาที่เหมาะสม โดยมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ทราบได้จากเตาเผาอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ น้ำ สารกักกระจายฟองอากาศ

1.3.2 ใช้อัตราการเพิ่มผงอะลูมิเนียม ในอัตราส่วนร้อยละ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 แทนที่ปูนซีเมนต์โดยปริมาตร แล้วหาอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การการนำความร้อน

1.3.3 ใช้อัตราการเพิ่มได้จากเตาเผาอุตสาหกรรมผลิตกระดาษในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 15 และ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์โดยปริมาตร แล้วหาอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การ การนำความร้อน

1.3.4 ในแต่ละอัตราส่วนจะหล่อก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 ซม. จำนวน ตัวอย่างต่อสัดส่วนบ่มเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดความหนาแน่นของอัตราส่วนผสม และร้อยละการดูดซึมน้ำ

1.3.5 เลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อนำมาหล่อเป็นบล็อกขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 15 x15x7.5 ซม. ทดสอบความทนไฟ และ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

1.3.6 นำค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ของสัดส่วนที่เหมาะสมแทนค่าลงไปในสูตร OTTV (Overall Thermal Transfer Value) เพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังอาคารเมื่อมีการเพิ่มบล็อกแก้วเข้าไปในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 แล้วศึกษาว่าควรเพิ่มบล็อกแก้วในอัตราส่วนเท่าไรจึงจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังอาคารได้ไม่เกินค่าตามมาตรฐานของกฎกระทรวง (พ.ศ. ๒๕๖๘)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ผลิตภัณฑ์บล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาจากเถ้าจากเตาเผากากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าท้องตลาด

1.4.2 ผลิตภัณฑ์บล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาที่ได้นั้นประชาชนทั่วไปหรือภาคเอกชนสามารถนำไปผลิตขายได้เพราะมีการลงทุนต่ำและมีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก

1.4.3 เพิ่มมูลค่าให้กับกากอุตสาหกรรมและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

1.4.4 ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากอุตสาหกรรม

1.4.5 ได้บล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน

1.4.6 เพื่อผลิตนวัตกรรมชนิดใหม่ที่มีจุดประสงค์ในการประหยัดการใช้ไฟฟ้าภายในอาคาร และเพิ่มความสวยงามให้กับผนังของอาคาร โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตกระดาษร่วมกับบล็อกแก้ว



บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากในปัจจุบันบล็อคมวลเบาได้เข้ามามีบทบาทต่ออุตสาหกรรมการก่อสร้างมากขึ้น ทุกที่จากคุณสมบัติเด่นที่มีน้ำหนักเบา ทนความร้อนได้สูง และยังเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีและจากน้ำหนักที่เบานี้ทำให้โครงสร้างแบกรับภาระน้อยลงส่งผลให้ขนาดของโครงสร้างเล็กลงตามไปด้วยงานวิจัยนี้ได้นำเอาการอุตสาหกรรมที่เหลือจากการผลิตเชื้อเพลิงของโรงงานผลิตกระดาษมาเป็นส่วนผสมหนึ่งของบล็อคมวลเบาซึ่งยังส่งผลดีต่อสภาพแวดล้อมอีกด้วย กล่าวคือกากอุตสาหกรรมที่เหลือจากการผลิตกระดาษเป็นของเสียที่ไม่สามารถเอาไปใช้ประโยชน์ได้ทำให้โรงงานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบจึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำกากปูนขาวนี้มาเป็นวัตถุดิบหนึ่งในการผลิตบล็อคมวลเบา ซึ่งถ้าผลการทดลองออกมาได้ผลตามที่ต้องการก็จะทำให้โรงงานไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากปูนขาวนี้และยังทำให้ต้นทุนในการผลิตบล็อคมวลเบาถูกลงอีกด้วย ซึ่งบล็อคมวลเบาที่ทำการวิจัยนี้เป็นบล็อคมวลเบาชนิดผสมผงอะลูมิเนียมแบบไม่อบไอน้ำ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กฤษฎา โรจน์ประสิทธิ์พร อราวินท์ บริรักษ์อราวินท์ และสุภัทรชัย สดกกล้า [5] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของบล็อคมวลเบาผสมเส้นใยไฟเบอร์ซึ่งบล็อคมวลเบาที่ใช้เป็นบล็อคมวลเบาที่เกิดจากการกักฟองอากาศในเนื้อบล็อก โดยวัตถุประสงค์ของการผสมเส้นใยไฟเบอร์นั้นเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงในบล็อกทำให้การแตกหักระหว่างการขนส่งและการทำงานลดลง จากผลการทดลองพบว่าปริมาณไฟเบอร์ที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงการเพิ่มขึ้นของทั้งกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดที่ค่านี้ อย่างไรก็ตามบล็อคมวลเบาที่มีแนวโน้มที่จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

คันธนา สุขะพล ปรีชา แก้วสวรรค์ และภารกิจ ละอองทอง [7] ได้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับบล็อคมวลเบาผสมกระดาษเพื่อการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกระดาษเหลือใช้มาผสมในบล็อคมวลเบา ซึ่งการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาหาปริมาณกระดาษและอัตราส่วนผสมน้ำและมอร์ตาร์ ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่ 1 : 2.75 ใช้ปริมาณกระดาษแทนที่ทรายร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งแต่ในละอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยกระดาษใช้

อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ 0.9, 1.0 และ 1.1 จากนั้นหล่อเป็นตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์ เซนติเมตร แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด , การดูคดกลืนน้ำ และหน่วยน้ำหนักที่อายุการบ่ม 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน จากการศึกษาพบว่าเมื่อสัดส่วนปริมาณกระดาษมากขึ้น หน่วยน้ำหนัก และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะลดต่ำลงแต่การดูคดกลืนน้ำจะมากขึ้น ซึ่งทุกสัดส่วนการผสมมี สัดส่วนเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 168-2531 การศึกษาปริมาณกระดาษและอัตราส่วนน้ำที่ เหมาะสมในอิฐประดับ ได้เลือกอัตราส่วนผสมจำนวน 3 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ใช้ปริมาณกระดาษ แทนที่ทรายร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักโดยใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ 0.9, 1.0, 1.1 ตามลำดับ มาทำอิฐประดับจากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูคดกลืนน้ำ หน่วยน้ำหนัก และ การถ่ายเทความร้อน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่ใช้ ปริมาณกระดาษแทนที่ทรายร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ 1:1 ได้ผลการทดสอบที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ มอก. 168-2531 คือ มีกำลังอัดเท่ากับ 2.78 MPa ค่าการดูคดกลืนน้ำเท่ากับ 26.71 % หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1459 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีน้ำหนักเบาและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของบล็อกมวลเบา และมีความ เป็นฉนวนความร้อนมากกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสม PVC ในสัดส่วนที่เท่ากัน

จิรพจน์ คุระเอียด มนตรี อโหสิ และวรวิทย์ พัฒนแก้ว [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องคาน บล็อกเสริมเหล็กโพลีเมอร์ซีเมนต์ เพื่อต้องการทราบค่าการรับน้ำหนักแบกทาน ค่าอัตราส่วนความ ปลอดภัยที่ได้จากการออกแบบและทดสอบจริง ตลอดจนหน่วยน้ำหนักของคานบล็อกเสริมเหล็ก โพลีเมอร์ซีเมนต์ โดยการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ ลดมลภาวะ และมี โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบามั่นคงแข็งแรง โดยการนำปูนซีเมนต์ ทราย และโพลีเมอร์ในอัตรา ส่วนผสม 1: 0.5 : 4 อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ 0.5 ปั่นขึ้นรูปเป็นวัสดุผสมหยาบโพลีเมอร์ซีเมนต์ นำมาใช้แทนหินในการผสมบล็อก บล็อกมวลเบาที่ได้เรียกว่า บล็อกมวลเบาโพลีเมอร์ซีเมนต์

สมพงษ์ ชื่นประไพ จิระศักดิ์ ไพราม และศุภชัย ศิลาประจวบ (2546) ได้ทำการศึกษารับ แรงอัดประลัยของบล็อกมวลเบาโพลีเมอร์ซีเมนต์ในอัตราส่วนผสม 1 : 2.2 : 5.3 อัตราส่วนน้ำตอ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.7 ได้กำลังอัดประลัยเท่ากับ 76 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การออกแบบคาน บล็อกเสริมเหล็กโพลีเมอร์ซีเมนต์ในงานวิจัยนี้ ทำการออกแบบโดยวิธี Strength Design Method (SFD) ตามมาตรฐาน ACI 318-89 และทดสอบการรับน้ำหนักแบกทานของคานบล็อกเสริมเหล็กโพลี เมอร์ซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C78 ทดสอบการรับแรงอัดประลัยตามมาตรฐาน ASTM C39 และ ทดสอบการรับแรงยึดเหนี่ยวตามมาตรฐาน ASTM A305 จากการทดสอบการรับน้ำหนักแบกทาน ของคานบล็อกเสริมเหล็กโพลีเมอร์ซีเมนต์จำนวน 3 ตัวอย่างสามารถรับน้ำหนักแบกทานเป็นจุดเฉลี่ย เท่ากับ 4,138 กิโลกรัม การทดสอบค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของคานบล็อกมวลเบาโพลีเมอร์ซีเมนต์ จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยเท่ากับ 60.138 กิโลกรัมต่อตาราง

เซนติเมตร และจากการออกแบบได้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 59.88 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ได้อัตราส่วนความปลอดภัยเฉลี่ยเท่ากับ 0.996 จากการทดสอบข้างต้นทำให้ทราบถึง ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากการออกแบบเท่ากับ 1.56 และจากการออกแบบเท่ากับ 2.82 มีความแตกต่าง 44.44 % และหน่วยน้ำหนักของคานบล็อกลมวเบาโพลีเมอร์ได้หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1880 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งตรงตามมาตรฐาน ACI 631 A51

จิระศักดิ์ ไพราม ศุภชัย ศิลาประจวบ และสมพงษ์ ชื่นประไพ [9] ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกรณีศึกษาการทำวัสดุผสมหยาบมวลเบาโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นการศึกษาคุณสมบัติของมวลเบาที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างซึ่งการพัฒนาบล็อกลมวเบาที่มีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อให้ได้บล็อกลมวเบาที่มีคุณสมบัติที่ดี ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเอมอร์ตาร์มาผสมกับโพลีเมอร์ทราย และน้ำ ในอัตราส่วนที่ต่างกันคือ 1:0.5:3, 1:0.5:4 และ 1:0.5:5 โดยปริมาตรและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4, 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ รวมไปถึงระยะเวลาที่ต่างกันคือ 3, 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นทำการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความถ่วงจำเพาะ จากผลการทดสอบได้อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:0.5:4 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน บล็อกลมวเบาผสมโพลีเมอร์สามารถรับแรงอัดได้สูงสุด 3.24 MPa ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 11.97 ซึ่งผ่านตามมาตรฐานมอก. ความหนาแน่น 1,090.96 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความถ่วงจำเพาะในอากาศ 1.12 จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของบล็อกที่ f_c' 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะรับกำลังอัดได้ 3.04 MPa และบล็อกมวลเบาที่ f_c' 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะรับกำลังอัดได้ 5.04 MPa

ชมาคุณ พุ่มแย้ม รัฐศาสตร์ คลังบุญครอง และอนันต์ ชิวดวงศ์ [10] ได้ศึกษาเรื่องการทำบล็อกลมวเบาจากเศษบล็อกลงานรื้อถอนผสมน้ำยากักกระจายฟองอากาศ เพื่อหาแนวทางที่จะนำวัสดุบล็อกที่ได้จากการรื้อถอนมาเป็นมวลรวมหยาบแทนการใช้หินจากธรรมชาติมาผลิตเป็นบล็อกเบา โดยทำการผสมน้ำยากักกระจายฟองอากาศในปริมาณร้อยละ 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 และ 1.00 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์โดยได้จากการออกแบบค่ากำลังอัดประลัยของบล็อกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในการศึกษาด้านกำลังอัดของบล็อกเบานี้จะใช้ก้อนตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตรจากผลการทดสอบค่ากำลังอัดประลัยของบล็อกตามมาตรฐาน ASTM C39-83 พบว่าค่ากำลังอัดประลัยของบล็อกเบานี้ที่อายุ 28 วัน แบบไม่ผสมน้ำยากักกระจายฟองอากาศของบล็อกที่ผลิตจากมวลรวมหยาบที่เป็นเศษวัสดุบล็อกที่ได้จากการรื้อถอนมีค่าเท่ากับ 348.57 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และบล็อกที่ผลิตจากมวลรวมหยาบที่เป็นหินจากธรรมชาติซึ่งมีค่าเท่ากับ 357.42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่างกันประมาณร้อยละ 2.47 และบล็อกเบานี้ที่ผลิตจากเศษวัสดุบล็อกที่รื้อถอนมีค่า

กำลังอัดน้อยที่สุดเท่ากับ 52.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรมีหน่วยน้ำหนัก 1,016 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่ปริมาณส่วนผสมน้ำยากักกระจายฟองอากาศร้อยละ 1.00 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยมีอัตราการดูดซึมเท่ากับร้อยละ 23.14

นรพงศ์ ศรีสวัสดิ์ พุฒิพล จวบศรีพันธุ์ และรัชฎ์ มั่งคั่ง [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องบล็อกบล็อกรวมเบาผสมขี้ข้าวโพดเผา ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นส่วนการนำเสนอการทดสอบการนำขี้ข้าวโพดเผา ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการทดสอบการนำขี้ข้าวโพดเผา มาผสมเพื่อทำบล็อกบล็อกรวมเบา โดยนำขี้ข้าวโพดมาผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดเบอร์ 4 นำไปแทนที่หินฝุ่นด้วยอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0.679, 0.779 และ 0.879 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมและทดสอบกำลังรับแรงอัดของบล็อกบล็อกรวมเบา ขนาด 7×19×39 เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าผลการทดสอบที่แทนที่ด้วยขี้ข้าวโพดเผา ร้อยละ 25 และ 30 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยอัตราส่วนร้อยละ 25 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.879 ให้กำลังดีที่สุดคือ 4.475×10^6 นิวตันต่อตารางเมตรได้ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.60 อัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 14.87% และหนัก 5,256 กรัม โดยค่าที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานบล็อกบล็อกรวมเบาไม่รับน้ำหนัก 58-2530

เบญจพล บุญเฉลิม พิชญ์ เตียรวัฒนศิริ และวีรวัฒน์ เทียมเพ็ง [14] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องบล็อกบล็อกรวมเบาโดยผสมสารเพิ่มฟองอากาศเพื่อศึกษาการเปรียบเทียบบล็อกบล็อกรวมเบาที่ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำและไม่ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำ วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ยิปซัม ถ่านหิน โดยมีอัตราส่วนที่แตกต่างกันคือ 30 : 20 : 20 : 30 และ 50 : 20 : 20 : 10 ซึ่งตัวควบคุมมีอัตราส่วนเท่ากับ 60 : 20 : 20 : 0 โดยใช้น้ำยากักกระจายฟองอากาศ เกรซ เออีโพร ปริมาณน้ำยาเกรซที่ใช้เท่ากับ 0.5% ต่อปริมาณน้ำ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และ 0.40 และ ทราซที่ใช้เป็นทราซละเอียดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 มีอัตราส่วนทราซต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1:1 การทดสอบกำลังอัดทำที่ 3, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าส่วนผสมที่ดีที่สุดเท่ากับ 50:20:20:10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และทำการบ่มด้วยไอน้ำด้วยการผสมนี้ได้ทำการหล่อเป็นบล็อกขนาด 7.5×20×35 เซนติเมตร ให้กำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 24.89 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 1.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 35.33 %

พิระ ณ ถลาง ศึกษา โยธจักร และฐปนพงศ์ ฐิติวิวัฒนกุล (2540) [18] ได้ศึกษาวิจัยการทำผนังบล็อกเบาสำเร็จรูปโดยใช้ซีเมนต์ แร่เพอร์ไลต์ และน้ำเป็นส่วนผสมในการทดลองแล้วทำการทดสอบหาอัตราส่วนผสมของบล็อกที่เหมาะสมเพื่อนำมาทำผนังบล็อกเบาสำเร็จรูปโดยกำหนดเงื่อนไขของการวิจัยให้บล็อกบล็อกรวมเบาต้องมีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่า 1,000 กก./ลบ.ซม. และมีค่า

กำลังอัดกำลังอัดประลัยไม่น้อยกว่า 30 กก./ตร.ซม. ซึ่งผลการศึกษาที่ได้พบว่าอัตราส่วนผสมของบล็อกเบาที่เหมาะสมคือปูนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อแร่เพอร์ไลต์ 4.56 ส่วนโดยปริมาตร ผนังบล็อกเบาที่ได้มีหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 765-781 กก./ลบ.ม และมีค่ากำลังประลัยเท่ากับ 36 กก./ตร.ซม. สำหรับผนังบล็อกแบบกลวงนอกจากนี้ยังพบว่าผนังบล็อกเบามีการดูดซึมน้ำโดยเฉลี่ย 38.20% โดยปริมาตรและมีความทนไฟได้นานกว่า 2 ชั่วโมง

ไชยยันต์ ชัยจักร ฐยา เข้มเกษสุคนธ์ และนราวิทย์ เสวตสมบุญ (2545) [12] ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันที่ได้จากอุตสาหกรรมที่ได้จากอุตสาหกรรมการรีไซเคิลเหล็กมาใช้ในการผสมบล็อกมวลเบาในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ส่วนค่าร้อยละของช่องว่างของมวลรวมเบาเท่ากับ 40 , 55 และ 70 โดยมีอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยในการแทนที่ในช่องว่าง 2 อัตราส่วนคือ 60 : 40 และ 40 : 60 จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่ได้มาทดสอบตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม หมายเลข 58 – 2530 จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสมคือการแทนที่ส่วนผสมที่ร้อยละของช่องว่างเท่ากับ 70 โดยมีอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย 40 : 60 ส่วนผสมดังกล่าวให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 44.80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและ 68.73 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 3 และ 28 วันตามลำดับนอกจากนี้ส่วนผสมดังกล่าวมีค่าโมดูลัสการแตกหักเท่ากับ 10.70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการดูดกลืนน้ำเท่ากับร้อยละ 37 มีความสามารถทนไฟได้มากกว่า 30 นาทีและมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.089 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส

กฤษณะ อภัยนอก สุพิทักษ์ จรูญรักษ์ และสิทธิชัย สุบินดี (2547) [6] ได้ศึกษาหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตบล็อกเบา โดยมีวัตถุประสงค์ในการประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว ยิปซัม และน้ำยากักระคายฟองอากาศแบ่งการผสมออกเป็นแบบเดิมอากาศและไม่เติมอากาศ นอกจากนี้ยังทดลองปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio) ด้วยผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม คือ แบบเดิมอากาศ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อทราย 1 ส่วนต่อปูนขาว 5 ส่วนต่อยิปซัม 3 ส่วนและมีปริมาณน้ำยาเคมีที่เหมาะสม คือ 7 มิลลิลิตร เทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.55 เมื่อนำส่วนผสมดังกล่าวมาหล่อเป็นแท่งบล็อกบ่ม 28 วันแล้วนำมาทดสอบพบว่ามีความแข็งแรงอัดเท่ากับ 28.80 กก./ตร.ซม. มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,120 กก./ลบ.ม. และอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 24.7% แท่งบล็อกนี้สามารถตัดด้วยเลื่อยมือเป็นบล็อกเพื่อนำไปก่อเป็นผนังได้

วชิรพงษ์ นิลเลิศ เกรียงไกร ศรีอรรคพรหม และเกรียงไกร ศรีรัตน์ (2547) [19] ศึกษาคุณสมบัติของบล็อกบล็อกรูปที่ได้จากวัสดุรีไซเคิล โดยแบ่งอัตราส่วนการผสมเป็น 4 ประเภทโดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ คือ 5 : 60 : 35 และ 10 : 70 : 20 แทนที่

ช่องว่างระหว่างมวลรวมร้อยละ 50 และ 70 ของช่องว่างทั้งหมดโดยวัสดุประสานวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมบล็อกล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก. 58-2533 ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสมคือ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ ต่อเถ้าลอย ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 10 : 70 : 20 มีช่องว่างระหว่างมวลรวมคิดเป็นร้อยละ 70 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานร้อยละ 30 ทั้งนี้ส่วนผสมดังกล่าวให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 33.88, 38.92, 51.80 และ 54.06 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อบ่มแห้งในอากาศ 3, 7, 28 วันและบ่มชื้นต่อเนื่อง 28 วันตามลำดับ มีค่าการดูดกลืนน้ำร้อยละ 20.62 และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.143 วัตต์/เมตร/องศาเซลเซียส

กิตติพล เกียรติวรยศ วันชัย ไ้วประเสริฐ และเกรียงศักดิ์ ห่วงน้ำ (2547)[3] ได้พัฒนาบล็อกล็อกจากกากอุตสาหกรรม 3 ประเภทได้แก่ เถ้าถ่านหิน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกรันเหล็ก เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้มีปริมาณน้อยที่สุดวัสดุประสานจะถูกนำมาแทนที่ร้อยละ 70 ของปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมและให้ตะกรันเหล็กทำหน้าที่เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในส่วนผสมโดยวัสดุประสานมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าถ่านหินต่อแคลเซียมคาร์ไบด์ 3 อัตราส่วนคือ 0 – 70 – 30, 5 – 67.5 – 27.5 และ 10 – 65 – 25 จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน กระทรวงอุตสาหกรรมหมายเลข 58-2530 จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ 10 - 65 - 25 มีค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 4.16, 16 และ 89 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 1, 3 และ 28 วันตามลำดับ นอกจากนี้ตัวอย่างดังกล่าวมีค่าโมดูลัสการแตกหักเท่ากับ 12.01 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการดูดกลืนน้ำเท่ากับร้อยละ 4.01 และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.108 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

กัมพล บุญสิงห์ โชคชัย พัฒนาศรี และยุพยง หากการ (2548)[4] ได้ศึกษาหาส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแท่งบล็อกเบาวัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสมแท่งบล็อกเบาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ยิปซัม สังกะเราะห์ที่ได้จากการดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง และสารกักกระจายฟองอากาศ แบ่งเป็นส่วนผสมแบบเต็มสารกักกระจายฟองอากาศ และแบบไม่เต็มสารกักกระจายฟองอากาศ ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อยิปซัมสังกะเราะห์ที่อัตราส่วน คือ 1:6.75, 1:50, 1:40, 1:3.25, 1:2.75 และ 1:2.50 โดยใช้น้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.50 สารกักกระจายฟองอากาศต่อปริมาณน้ำเท่ากับ 0.10 ผลการทดลองพบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการผลิตบล็อกมวลเบาคืออัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อยิปซัมสังกะเราะห์ 1 : 2.75 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50 สารกักกระจายฟองอากาศต่อปริมาตรน้ำ 0.1 มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง 941 กก./ลบ.ม.ที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 35.4 กก./ตร.ซม. และมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 15.23 เปอร์เซนต์แท่งบล็อกมวลเบาอเนกประสงค์ใช้ยิปซัม

ตั้งกระห่างจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะเป็นมวลรวมหลักสามารถใช้เชื้อธรรมชาติเชื้อออกเป็นบล็อกลูกก่อนหรืออื่นๆ ได้ตามต้องการ

เบญจพล บุญเฉลิม พิเชฐ เตียรวัฒนศิริ และวีระวัฒน์ เทียมเพ็ง (2548) [14] ทำการวิจัยเปรียบเทียบบล็อกลมมวลเบาที่ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำและไม่ได้ผ่านการบ่มด้วยไอน้ำวัสดุที่ใช้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ปูนขาว ยิปซัม เถ้าถ่านหิน โดยมีอัตราส่วนที่แตกต่างกันคือ 30 : 20 : 20 : 30 และ 50 : 20 : 20 : 10 ซึ่งควบคุมที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 60 : 20 : 20 : 0 โดยใช้ก๊าซจกกระจายฟองอากาศ เกรซ เออีโฟร์ ปริมาณน้ำยาเกรซที่ใช้เท่ากับ 0.5% ต่อปริมาณน้ำ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้เท่ากับ 0.35 และ 0.4 และทรายที่ใช้เป็นทรายละเอียดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 มีอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 การทดสอบกำลังอัดทำที่ 3, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า ส่วนผสมที่ดีที่สุดเท่ากับ 50 : 20 : 20 : 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และผ่านการบ่มด้วยไอน้ำด้วยส่วนผสมนี้ได้ทำการหล่อบล็อกขนาด $7.5 \times 20 \times 35$ เซนติเมตร ให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 24.89 กก./ตร.ซม. ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยที่อายุ 28 วันเท่ากับ 1.22 กรัม/ลบ.ซม. และค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 35.33%

ปิยะพงษ์ โมรา สุธาสิณี พัทธพรเพิ่ม และอิทธิ ยศมณี (2550)[15] ศึกษาหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการใช้อิฐบล็อกและบล็อกลมมวลเบา โดยใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าถ่านหินมาแทนที่ปูนซีเมนต์ และแทนที่มวลรวมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดโดยหล่อตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. ใช้เวลาในการบ่มที่อายุ 3, 7 และ 28 วันตามลำดับผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมของอิฐบล็อก คือ การนำเถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ 60% แทนที่มวลรวม 40% ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 38.354 กก./ตร.ซม. และส่วนผสมที่เหมาะสมของบล็อกลมมวลเบา คือ ปูนซีเมนต์ 1 ส่วนเถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าถ่านหินแทนที่มวลรวม 100% ยิปซัม 3% ปูนขาว 5% น้ำยากักกระจายฟองอากาศ 7 มล./กก. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 1.00 ให้กำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับ 80.336 กก./ตร.ซม. ค่าความต้านทานแรงดัดเท่ากับ 19.694 กก./ตร.ซม. มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 862 กก./ลบ.ม. และอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 37.456 %

ผศ.ดร.วัชร เพิ่มชาติ [20] ศึกษาการพัฒนาการผลิตอิฐมวลเบาให้มีคุณภาพดีขึ้น ในขณะเดียวกันจะช่วยลดต้นทุนการผลิตด้วย โดยการนำเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยแกลบมาเป็นส่วนผสมในการผลิต การดำเนินงานแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) ศึกษาคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของอิฐมวลเบาเดิมของบริษัทฯ เมื่อผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ คุณสมบัติของอิฐที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความแข็งแรงและค่าการนำความร้อน 2) สร้างห้องทดสอบขนาด $2.3 \times 2.3 \text{ m}^2$ สูง 2.4 m โดยใช้อิฐมอญและอิฐมวลเบาที่ผสมเถ้าลอย ทำการวัดอุณหภูมิภายในห้องเพื่อเปรียบเทียบกับ ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมเถ้าลอยของทั้งถ่านหินและแกลบที่ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรง

สูงที่สุด โดยอิฐมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยถ่านหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง < 150 ไมครอน จะให้ค่าความแข็งแรงที่ 81 kg/cm^2 ในขณะที่อิฐมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยถ่านหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 - 300 ไมครอน และเถ้าลอยแกลบ จะให้ค่าความแข็งแรงที่ 50 และ 31 kg/cm^2 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการนำความร้อนของอิฐมวลเบาจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนเถ้าลอยที่ผสมเพิ่มขึ้น และอิฐที่ผสมเถ้าลอยแกลบจะให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่าเถ้าลอยถ่านหิน ส่วนผลการวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบพบว่า ห้องที่สร้างจากอิฐมวลเบามีค่าต่ำกว่าห้องที่สร้างจากอิฐมวลเหนียว $1.0 - 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ปิติ พานิชายนนท์ ฉัตร ผลนาค สุวิทย์ เพชรห้วยลึก ธวัชพันธ์ เทพนวล นพพันธ์ นานคง แนน อนุจิตร จันทศรี (2551)[16] วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากฟางข้าวที่เหลือใช้ในชุมชนจังหวัดพัทลุง ในการศึกษาพิจารณาที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกันหลายส่วนผสม และทำการผลิตส่วนผสมละ 5 ก้อนการทดสอบตัวอย่างจะทำการทดสอบน้ำหนัก ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าแรงอัด จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มฟางข้าวเป็นส่วนผสมสามารถ ลดน้ำหนักและความหนาแน่นของตัวอย่างได้ ซึ่งอัตราส่วนโดยปริมาตรของ ดิน : ทราย : ซีเมนต์ : ฟาง ที่ให้สมบัติของบล็อกดีที่สุด คือ 10:5:8:8 มีความหนาแน่น 1591 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าแรงกด 37.56 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ 19.84 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีฟางข้าว พบว่า น้ำหนักและความหนาแน่นลดลงอย่างเห็นได้ชัดคือ 29.38 เปอร์เซ็นต์ และ 47.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ไชยยันต์ ชัยจักร สมิตร ส่งพิริยะกิจ ดร. กุลพัฒน์ วัฒนกุล (2552)[21] บทความนี้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาโดยการใช้ตะกรันจากอุตสาหกรรมรีไซเคิลเหล็กเป็นมวลรวมหยาบเพื่อทดแทนการใช้หินโดยมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน ในการทดลองวัสดุประสานจะประกอบด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 60:40 และ 40:60 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 นอกจากนี้ยังกำหนดให้วัสดุประสานมีปริมาตรร้อยละ 40, 55 และ 70 ของช่องว่างมวลรวม การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาเป็นไปตาม มอก. 58-2530 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้วัสดุประสานที่มีอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าถ่านหิน 40:60 แทนที่ช่องว่างระหว่างมวลรวมในอัตราร้อยละ 70 สามารถให้ค่ากำลังอัดได้เท่ากับ 44.80 และ 68.73 กก./ตร.ซม.ที่อายุ 3 และ 28 วัน ตามลำดับ และมีความชื้นการแตกหักเท่ากับ 10.71 กก./ ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน นอกจากนี้ยังมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำเพียง 0.089 วัตต์/ เมตร/ องศาเซลเซียส โดยมีความหนาแน่นเท่ากับ 1380 กก./ ลบ.ม.

2.2 บล็อกมวลเบา

บล็อกมวลเบาหมายถึงบล็อกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าปกติ (2450 kg/m^3) โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ [5]

2.2.1 บล็อกมวลเบาที่ได้จากการใช้มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate Concrete) บล็อกมวลเบาชนิดนี้เกิดจากการผสมมวลรวมที่มีรูพรุนและความหนาแน่นต่ำกับปูนซีเมนต์ มวลรวมประเภทนี้อาจจะเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ข้อดีของการผลิตบล็อกมวลเบาดังกล่าววิธีนี้มีหลายประการ เช่น

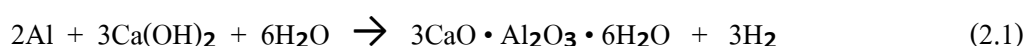
1) การที่มวลรวมมีรูพรุนทำให้เกิดการดูดซึมน้ำในปริมาณมาก ต้องทำการชดเชยปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ความสามารถในการเทที่ต้องการ (Workability)

2) ความยากในการชดเชยปริมาณน้ำที่หายไปจากสัดส่วน ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซึมน้ำของมวลรวมมักจะมีความแปรผันค่อนข้างสูงขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเนื้อวัสดุและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก

3) คุณภาพของมวลรวมเองที่ไม่สม่ำเสมอและราคาแพง

2.1.2 บล็อกมวลเบาที่ได้จากการกักฟองอากาศ (Cellular or Aerated Concrete) บล็อกมวลเบาที่ผลิตโดยวิธีกักฟองอากาศแตกต่างจากบล็อกมวลเบาที่ผลิตโดยใช้มวลรวมน้ำหนักเบา โดยการผลิตจะใส่ฟองอากาศปริมาณสูงเข้าไปแทนที่เนื้อซีเมนต์ จากนั้นปล่อยให้บล็อกแข็งตัวก็จะได้บล็อกที่มีปริมาณฟองอากาศสูงกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งบล็อกที่ได้จะมีมวลเบาตามที่ต้องการ กระบวนการผลิตแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

1) การผลิตโดยใช้อะลูมิเนียมออกไซด์ กระบวนการผลิตนี้ถูกคิดค้นครั้งแรกใน ค.ศ. 1914 โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างผงอะลูมิเนียมกับซีเมนต์ ซึ่งอะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นในเนื้อบล็อก ทำให้เกิดการขยายตัวและมีปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อบล็อกแข็งตัวก็จะได้บล็อกที่มีรูพรุนสูงและน้ำหนักเบา แสดงดังสมการที่ (2.1)



วิธีการนี้ถึงจะเป็นเทคโนโลยีเก่าแต่ปัจจุบันก็ยังมีการใช้งานอยู่ทั่วไป ข้อเสียของวิธีนี้ คือ กระบวนการที่ยุ่งยากและใช้พลังงานสูงทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนนั้นเป็นปฏิกิริยาหลัก

(Primary) มีความจำเป็นต้องรอการเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยา ไฮเดรชันก่อนซึ่งเป็นปฏิกิริยารอง (Secondary) จากนั้นเมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับผงอะลูมิเนียมขบวนการเกิดฟองแก๊สไฮโดรเจนจึงเริ่มขึ้น การที่ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สเป็นปฏิกิริยารองนั่นเองเป็นที่มาของปัญหาใหญ่ในกระบวนการผลิต ในช่วงต้นที่บล็อกยังมีสภาพเหลว มีความยืดหยุ่นตัวสูงนั้น การขยายตัวของแก๊สไฮโดรเจนไม่ก่อให้เกิดปัญหาใดๆ แต่เมื่อบล็อกเริ่มก่อตัวประมาณ 2-3 ชั่วโมงหลังจากการผสมบล็อกจะเริ่มแข็งตัวทำให้ความยืดหยุ่นของบล็อกต้องลดลงตามไปด้วย เมื่อกระบวนการเกิดแก๊สและกระบวนการแข็งตัวต้องดำเนินต่อไปอีกหลายชั่วโมงย่อมต้องก่อให้เกิดปัญหาตามมา ความไม่สัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเกิดแก๊สและระยะเวลาในการแข็งตัวส่งผลให้บล็อกดังกล่าวมีรอยร้าวขนาดใหญ่ กำล้างดำ แดงหักง่าย ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงต้องมีการใช้ความร้อนและความดันเข้ามาช่วย การใช้ความร้อนเพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาการเกิดแก๊สให้สัมพันธ์กับการก่อตัว เพื่อไม่ให้บล็อกเกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ ส่วนการใช้ความดันเป็นการควบคุมให้การขยายตัวของบล็อกอยู่ในพื้นที่ที่ต้องการ และทำให้บล็อกมีรูปร่างที่แน่นอน

2) การผลิตโดยการทำฟองหรือโฟมด้วยสารกักกระจายฟองอากาศวิธีนี้ถูกคิดค้นในปี ค.ศ. 1950 แนวคิดของกระบวนการผลิตนี้คือ การทำฟองอากาศปริมาณสูงมาก่อนที่จะผสมลงไปในบล็อก ในช่วงเริ่มต้นสารสร้างฟองอากาศที่ใช้เป็นผงซักฟอกหรือน้ำยาซักผ้า ซึ่งมีข้อเสียคือฟองอากาศที่ได้จะไม่เสถียรและแตกหักง่ายในปัจจุบันมีการใช้สารกักกระจายฟองอากาศที่มีส่วนผสมทางเคมีของ Poly Oxy Ethylene Alkyl Ether โดยฟองอากาศที่ได้จากวิธีนี้จะเสถียรและคงรูปมากกว่าฟองอากาศที่ได้จากผงซักฟอก กระบวนการผลิตจะเริ่มจากการใส่สารกักกระจายฟองอากาศปริมาณสูงลงไปปั่นในเครื่องผลิตฟองอากาศจากนั้นจะฉีดพ่นเข้าไปในโมล์ผสมบล็อกเพื่อให้ฟองอากาศเข้าไปแทรกตัวตามเนื้อบล็อก เมื่อบล็อกแข็งเนื้อบล็อกที่ได้จะมีรูพรุนสูง และมีน้ำหนักเบา กระบวนการผลิตบล็อกมวลเบาด้วยวิธีนี้ค่อนข้างง่ายกว่าวิธีแรกเนื่อง จากไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนและความดันเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ต้นทุนทางด้านพลังงานต่ำลงแต่บล็อกที่ได้จากวิธีนี้จะมีน้ำหนักมากกว่าบล็อกที่ได้จากวิธีแรกเล็กน้อย ปัจจุบันบล็อกมวลเบาถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น บล็อกบล็อกรูปร่างสำเร็จรูป ฉนวนในผนังกันความร้อน ผนังรับน้ำหนัก หลังคา แผ่นพื้น เป็นต้น

2.3 คุณสมบัติของบล็อกมวลเบา

2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของบล็อกมวลเบาหนา 10 เซนติเมตร เมื่อรวมน้ำหนักวัสดุกับน้ำหนักปูนฉาบจะมีน้ำหนักประมาณ 120 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในขณะที่อิฐมวลเบาก่อ 2 ชั้น (เว้นช่องตรงกลาง) จะมีน้ำหนักประมาณ 180 กิโลกรัมต่อตารางเมตรซึ่งน้ำหนักของการก่ออิฐมวลเบามากกว่าทำให้ต้องเตรียมโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้นเป็นเหตุทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น

2.3.2 ความคงทน ในที่นี้หมายถึงความสามารถของวัสดุหรือส่วนประกอบในการคงทนต่อสภาพแวดล้อมโดยไม่เกิดความสูญเสียรูปร่างหรือสีกร่อนในงานโครงสร้างอาคารสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือ การกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี ความเค้นทางกายภาพ และการถูกระแทกเนื่องจากแรงภายนอกทั้งหลาย บล็อกมวลเบาโดยทั่วไปไม่สามารถที่จะทนต่อสิ่งต่างๆที่กล่าวมาได้ ทั้งนี้เพราะความที่มีรูพรุนมากในตัวมันเอง ดังนั้นบล็อกมวลเบาจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับก่อสร้างในดินชั้นที่มีสารพวกซัลเฟตปนอยู่ แต่อย่างไรก็ตามในทุกกรณีบล็อกมวลเบาควรจะได้รับ การฉาบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ความเค้นทางกายภาพที่มีผลต่อบล็อกมวลเบาได้แก่ ความเค้นที่เกิดขึ้นจากน้ำแข็งที่อยู่ภายในรูพรุนเกิดการหดตัวเมื่อแข็ง และจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทั้งนี้เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนของบล็อกมวลเบามีค่าระหว่าง $8 \times 10^{-6} - 9 \times 10^{-6}$ องศาเซลเซียส ซึ่งไม่ต่างจากบล็อกธรรมดาเท่าไรนัก ดังนั้นผลของการเกิดน้ำแข็งที่กระทำกับบล็อกมวลเบาจึงคล้ายกับที่เกิดขึ้นในบล็อกธรรมดา ภายใต้สภาวะเดียวกัน การหดตัวเมื่อแข็งและการเปลี่ยนแปลงเมื่อขึ้นในบล็อกมวลเบามีมากกว่าบล็อกธรรมดาในบางกรณีค่าเหล่านี้สูงมาก และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำมาคิดอย่างละเอียดในการออกแบบ การแตกหักของบล็อกเนื่องจากแรงภายนอกอาจจะมีผลมากจากการขีดสีการกระแทก และการรับน้ำหนักมากเกินไป เช่น บล็อกฟองอากาศอาจจะเกิดแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับการขีดสี ความอ่อนแอของวัสดุชนิดนี้อาจนำไปสู่ความเสียหายของอาคารทั้งหลายก็เป็นไปได้ ดังนั้นในการใช้บล็อกมวลเบาแต่ละชนิดควรให้ความระมัดระวังอย่างยิ่งโดยเฉพาะในระหว่าง การก่อสร้าง

2.3.3 การเป็นสนิมของเหล็ก เป็นอุปสรรคสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้บล็อกมวลเบาไม่เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในงานบล็อกเสริมเหล็กเท่าที่ควรกล่าวคือ ความเป็นรูพรุนของเนื้อบล็อกซึ่งอาจจะเป็นช่องทางให้ความชื้นเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้ง่าย อย่างไรก็ตามเรื่องนี้สามารถป้องกันได้ โดย การใช้บล็อกมวลเบาประเภทอัดแน่นอย่างดียิ่งสำหรับงานโครงสร้าง บล็อกชนิดนี้โดยเฉพาะที่

ผสมโดยมวลรวมน้ำหนักเบาที่เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาทางเคมีสามารถเป็นตัวต้านทานต่อการเกิดสนิมของเหล็ก และการเสื่อมโทรมของตัวมันเองมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมรรถนะและความทนทานของบล็อกเสริมเหล็กมากกว่าชนิดของมวลรวมน้ำหนักเบาที่ใช้ประสบการณ์ที่ใช้ในงานบล็อกเสริมเหล็กที่ทำมาจากมวลรวมน้ำหนักเบาชนิดต่างๆ ทั้งในทวีปยุโรปและอเมริกาได้สนับสนุนวัสดุชนิดนี้เป็นอย่างมาก เช่น การทำท่าเรือบล็อกมวลเบาเสริมเหล็กในระหว่างสงครามโลกทั้งสองครั้ง การสร้างท่าเรือลอยน้ำสำหรับขพลขึ้นบกในระหว่างการบุกยุโรปของฝ่ายสัมพันธมิตรในสงครามโลกครั้งที่สอง การทำอาคารที่อยู่อาศัยและการทำแผ่นฉนวนกันความร้อนสำหรับเหมืองถ่านหิน เป็นต้น การเกิดสนิมนั้นเนื่องมาจากความชื้นและก๊าซออกซิเจนอิสระทำปฏิกิริยากับเหล็กและในบรรยากาศที่มีสารประกอบซัลเฟอร์และคลอไรด์ การผุกร่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อการป้องกันให้เพียงพอ บล็อกหุ้มเหล็กเสริมต้องหนาอย่างน้อย 50 มิลลิเมตร แต่ในกรณีที่สภาพแวดล้อมเลวร้ายจริงๆ เช่น ในบรรยากาศที่มีความชื้นมากๆ หรือในดินที่มีสารเคมีที่เป็นปฏิปักษ์บล็อกหุ้มควรจะมีความหนา 75 มิลลิเมตรขึ้นไปไม่ว่ามวลรวมที่ใช้จะเป็นชนิดใดก็ตามสำหรับบล็อกฟองอากาศเสริมเหล็ก เหล็กเสริมจะต้องได้รับการป้องกันอย่างดีโดยการเคลือบผิวก่อนการเทบล็อก การเคลือบผิวนี้ทำโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับยางลาเท็กซ์ธรรมชาติหรือสารบิพูเมนแข็งวัสดุทั้งสองอย่างนี้เมื่อจับแน่นกับเหล็กแล้วสามารถกันน้ำซึมผ่านได้อย่างดี

2.3.4 การซึมของน้ำฝน หน้าที่สำคัญอย่างหนึ่งของผนังอาคารด้านนอก คือ การป้องกันน้ำฝนในกรณีที่ทำผนังสองชั้นแบบที่มีช่องว่างข้างในปัญหาเรื่องการซึมของน้ำฝนอาจจะไม่เกิดขึ้นอีกเลยแต่ในกรณีของผนังบางชั้นเดียวนั้นมักจะมีปัญหาเรื่องน้ำฝนซึมผ่านมากในการซึมผ่านของน้ำฝนนั้นบางครั้งน้ำฝนจะซึมผ่านเข้าทางเนื้อบล็อกโดยตรงแต่ส่วนใหญ่แล้วน้ำฝนมักจะซึมผ่านเข้าทางช่องรอยแตกของรอยต่อมากกว่าบล็อกยังกันน้ำได้ดีเท่าไร ความชื้นก็จะซึมผ่านเข้าทางรอยแตกของช่องรอยต่อมากขึ้นเท่านั้นบล็อกมวลรวมน้ำหนักเบาที่มีช่องว่างรูปฟองที่ผิว ดังนั้น การใช้วัสดุชนิดนี้ทำผนังที่มีความหนาเพียงพอและทำอย่างถูกต้องจะสามารถให้การต้านทานอย่างดีต่อการซึมผ่านของน้ำฝน ด้วยเหตุผลข้างต้นบล็อกฟองอากาศที่ไม่มีการฉาบผิวจึงมีการซึมผ่านของน้ำฝนเพียงเล็กน้อย ถ้าหากผนังไม่บางมากจนเกินไปแล้วไม่ต้องห่วงเรื่องการซึมผ่านน้ำฝน

2.3.5 การหดตัวเมื่อแห้งและการคืบตัว ผลลัพท์จากปูนซีเมนต์ทุกชนิดมักจะแสดงการยิดหดตัวเมื่อมันได้รับการเปลี่ยนแปลงของความชื้น เมื่อบล็อกแห้งใหม่ๆ มักจะเกิดการหดตัว ซึ่ง

เรียกกันว่า “ การหดตัวเมื่อแห้งครั้งแรก ” หลังจากนั้นการเปียกและการแห้งจะมีผลให้บล็อกเกิดการขยายตัวและหดตัวสลับกันไปซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น “ การยืดหดตัวตามความชื้นซึ่งกลับไปกลับมาได้ ” ผลของการหดตัวของบล็อกจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในเนื้อบล็อกถ้าบล็อกนี้เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่มีขอบเขตของการเคลื่อนที่จำกัดมันก็จะเกิดการแตกร้าวขึ้น

บล็อกที่ทำด้วยมวลรวมน้ำหนักเบาโดยทั่วไปมีการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าบล็อกธรรมดา สำหรับบล็อกที่ทำด้วยมวลรวมหยาบชนิดเดียวกันบล็อกที่ไม่มีมวลรวมละเอียดจะหดตัวน้อยกว่าบล็อกที่มีมวลรวมละเอียด บล็อกฟองอากาศห่อสำเร็จจะมีค่าการหดตัวเมื่อแห้งใกล้เคียงกับบล็อกมวลรวมน้ำหนักเบาแต่บล็อกฟองอากาศห่อในที่อาจจะมีค่ามากกว่า 5 - 10 เท่า ในบางครั้งค่าของการหดตัวเมื่อแห้งสำหรับบล็อกชนิดต่างๆ จำเป็นมากที่จะนำมาคิดในการออกแบบเพื่อป้องกันการแตกร้าว เช่น การเสริมเหล็กตามจุดต่างๆ ที่คิดว่าเกิดการแตกร้าวอาจจะเกิดขึ้นได้ หรือการทำข้อต่อไว้ ณ จุดที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดึงขึ้นในเนื้อบล็อก บล็อกไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากความชื้นเท่านั้น แต่มันยังมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเมื่อมันได้รับความเค้นติดต่อกันเป็นเวลานาน พฤติกรรมเช่นนี้เรียกว่า การคืบตัว (Creep) การคืบตัวของบล็อกจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดการรับน้ำหนักส่วนผสมของบล็อก และขนาดของชิ้นส่วนสำหรับบล็อกที่มีกำลังอัดเท่ากัน บล็อกมวลเบาส่วนใหญ่จะมีการคืบตัวและการหดตัวตามความชื้นมากกว่าบล็อกธรรมดา การคืบตัวเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาเพราะจะนำไปสู่การสูญเสียแรงอัด

2.3.6 การป้องกันไฟ เมื่อเกิดเพลิงไหม้โครงสร้างที่ทำด้วยเหล็กกล้าหรืออะลูมิเนียมอันลอยจะยืนหยัดอยู่ได้ไม่นานเพราะเมื่ออุณหภูมิของเหล็กกล้าสูงขึ้นถึง 555 องศาเซลเซียส และอะลูมิเนียมอัลลอย 200-250 องศาเซลเซียส กำลังของโลหะเหล่านี้จะตกลงทันทีภายในสองถึงสามวินาทีที่เกิดเพลิงไหม้ ดังนั้นเพื่อที่จะหน่วงกำลังของโครงสร้างเหล็กกล้าไว้การห่อหุ้มเหล็กกล้าด้วยบล็อกจึงเป็นสิ่งที่มีความเหมาะสมมาก ตามหลักปฏิบัติทั่วไปกำหนดให้บล็อกหุ้มมีความหนาไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร จึงจะต้านทานความร้อนได้เพียงพอ อย่างไรก็ตามการพองตัวของเนื้อบล็อกอาจจะเกิดขึ้นได้ถึงกระนั้นก็ตาม การทำเช่นนี้ก็ยิ่งช่วยหน่วงไฟไว้ได้มากทั้งนี้เนื่องจากการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี บล็อกเบาจึงเป็นวัสดุอย่างดีเลิศสำหรับการป้องกันโครงสร้างเหล็กกล้าในเวลาเกิดเพลิงไหม้ บล็อกสำหรับห่อหุ้มสมัยใหม่นี้ทำเป็นรูปบล็อก หรือทำเป็นแผ่น ตัวอย่าง เช่น บล็อกฟองอากาศ บล็อกมวลรวมน้ำหนักเบา บล็อกบล็อก วัสดุน้ำหนักเบาที่ใช้กันมากมีตะกรัน

เตาเผา ดินเหนียวพองตัว ถ้ำเชื้อเพลิงผง และฟอสฟอรัส วัสดุเหล่านี้ถือเป็นมวลรวมน้ำหนักเบาชั้นหนึ่งในแง่ของการต้านทานไฟ

2.3.7 การกันเสียง โดยปกติบล็อกมวลเบาจะกันเสียงได้ดีกว่าอิฐมวลเบา 20% แต่ในกรณีที่ใช้อิฐมวลเบาก่อน 2 ชั้น ช่องว่างตรงกลางจะทำหน้าที่เป็นฉนวนได้ดีกว่าเกือบ 2 เท่าตัว แต่อิฐมวลเบาลดการสะท้อนของเสียงได้ดีกว่าเนื่องจากโครงสร้างของบล็อกมวลเบามีฟองอากาศจำนวนมากอยู่ภายในทำให้ดูดซับเสียงได้ดี จึงเหมาะกับห้องหรืออาคารที่ต้องการความเงียบ เช่น โรงภาพยนตร์ หรือห้องประชุม

2.3.8 ประหยัดพลังงานนอกจากสามารถป้องกันความร้อนได้ดีกว่าอิฐมวลเบาแล้วยังทำให้ใช้เครื่องปรับอากาศที่มีขนาดเล็กลงด้วยทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าไปได้มาก เนื่องจากสามารถกันความร้อนได้ดีกว่าอิฐมวลเบา 4-8 เท่า จึงช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้เป็นอย่างดี

2.3.9 ใช้งานง่ายและรวดเร็ว เนื่องจากการผลิตที่เป็นมาตรฐานทำให้สินค้าออกมามีขนาดเท่ากันทุกก้อน ไม่เหมือนกับอิฐมวลเบายังมีความไม่เป็นมาตรฐานอยู่ในงานก่อสร้าง โดยอิฐมวลเบาจะใช้เวลาในการก่อและเกิดการเสียหายน้อยกว่า โดยเฉลี่ยแล้วใน 1 วันจะก่อผนังโดยใช้อิฐมวลเบาได้ประมาณ 25 ตารางเมตร ในขณะที่ก่ออิฐมวลเบาได้เพียง 12 ตารางเมตรเท่านั้น

2.3.10 มิติเที่ยงตรง ขนาดมิติเที่ยงตรง แน่นอน ได้ชิ้นงานเรียบสวยงาม มีหลายขนาดให้เลือก

2.3.11 อายุการใช้งานยาวนานเท่ากับโครงสร้างบล็อก (50 ปี)

2.4 ปูนซีเมนต์

เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ ซึ่งได้แก่ หินปูนหรือดินขาว และดินเหนียวหรือดินดาน ที่อุณหภูมิ 1400-1500 องศาเซลเซียส ในสัดส่วนที่ถูกต้อง อาจมีการเติมแร่เหล็กหรือยิปซัมตามความจำเป็น เพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติตามต้องการ บล็อกที่ผสมใหม่และยังเหลืออยู่นั้น ส่วนที่เป็นของแข็งของปูนซีเมนต์จะลอยตัวอยู่ในน้ำชั่วคราว เม็ดปูนแต่ละเม็ดจะถูกแยกไว้ด้วยชั้นบางๆ ของน้ำก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สามารถสร้างแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์เล็กๆ การเกาะตัวกันที่ต่อเนื่องก่อให้เกิดการยึดตัวรวมกันเป็นก้อนได้ บล็อกที่ได้นั้นได้จากการที่อนุภาคของมวลรวม ทั้งอนุภาคเล็กและใหญ่ ทุกอนุภาคถูกเคลือบและหุ้มด้วย

ซีเมนต์เพสต์ซึ่งเป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ล้วนๆกับน้ำส่วนมอร์ตาร์เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับมวลรวมละเอียดปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นและใช้กันมากที่สุดคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์[21]

2.4.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทดังนี้

1) องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ในรูปออกไซด์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบนำมาใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ มีดังต่อไปนี้

- แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีประมาณร้อยละ 60-67 ได้มาจากหินปูน (Limestone) และหินชอล์ค (Chalk)
- ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มีประมาณร้อยละ 17-25 ได้มาจากดินดาน หรือดินเหนียว (Clay) และหินเชล (Shale)
- อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) มีประมาณร้อยละ 3-8 ได้มาจากดินเหนียว หรือดินดำ และหินเชล
- เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มีประมาณร้อยละ 0.5-6 ได้มาจากดินเหนียว ดินดำ หินเชล หรือศิลาแลง (Laterite) นอกจากนี้ยังต้องใช้ยิปซัม (Gypsum – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ปริมาณร้อยละ 4-6 ผสมในเม็ดปูนเพื่อป้องกันการก่อตัวเฉียบพลันและช่วยหน่วงระยะเวลาการแข็งตัว

2) องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ในรูปสารประกอบเกิดจากการนำวัตถุดิบ เช่น ดินขาวและดำ เป็นต้น มาเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส แล้วปูนขาว (CaO) ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก จนได้เม็ดปูนซึ่งมีอุณหภูมิ 1200-1300 องศาเซลเซียส สารประกอบของปูนซีเมนต์มีดังนี้

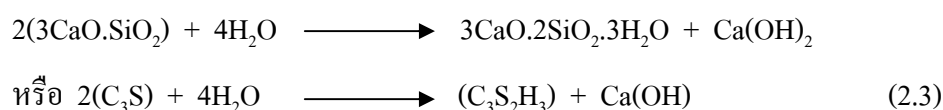
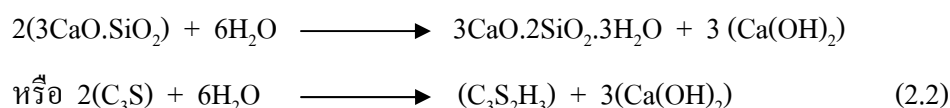
- ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) หรือ C_3S มีปริมาณร้อยละ 49 มีผลทำให้กำลังรับแรงของบล็อกเพิ่มขึ้นในช่วง 4 สัปดาห์แรก
- ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) หรือ C_2S มีปริมาณร้อยละ 25 มีผลทำให้กำลังรับแรงของบล็อกเพิ่มขึ้นแต่ช้ากว่า C_3S และจะเพิ่มต่อไปประมาณ 1 ปี
- ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) หรือ C_3A มีปริมาณร้อยละ 12 มีผลให้กำลังรับแรงของบล็อกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือ เมื่อผ่านไปเป็นเวลานานๆ จะรวมตัว

กับซัลเฟตกลายเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของบล็อก ซึ่งอาจเกิดการแตกร้าวได้นอกจากนี้ C_3A ยังมีความสำคัญในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์โดยทำให้ปูนซีเมนต์กับซิลิกา รวมตัวกันอย่างรวดเร็ว

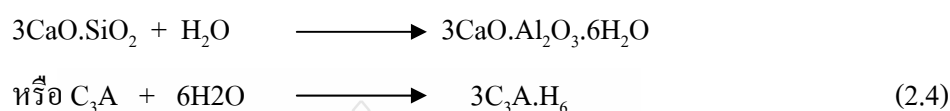
- เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) หรือ C_4AF มีประมาณร้อยละ 8 เป็นสารประกอบที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิกา โดยรวมตัวกับยิปซัมแล้วเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมซัลโฟฟูริก

2.4.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นเมื่อนำปูนซีเมนต์มาผสมกับน้ำ ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซีเมนต์จะค่อยๆ แข็งตัวและมีความมั่นคงจนกลายเป็นซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวเต็มที่ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณซิลิกาและอลูมิเนตในสภาวะเริ่มแรกของปฏิกิริยาไฮเดรชัน สารประกอบแคลเซียมซิลิกา 2 ตัว คือ ไตรแคลเซียมซิลิกา (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิกาจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อนอย่างรวดเร็วแล้วค่อยๆ ลดลงในเวลาต่อมาผลจากการเกิดปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิกา (C_3S) จะเปลี่ยนเจลของแคลเซียมซิลิกาไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) และน้ำปูน ($Ca(OH)_2$) แยกออกมาสำหรับไดแคลเซียมซิลิกา (C_2S) จะเกิดปฏิกิริยาล้ากันแต่จะได้น้ำปูนน้อยกว่าปัจจุบันจะเขียน $C_3S_2H_3$ ในรูป $C-S-H$ เรียก ว่าโทเบอร์โมไลต์เจลแคลเซียมซิลิกาเกิดทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะทำให้เกิดน้ำปูน ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิกาไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน น้ำปูนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีนี้จะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ได้มีคุณสมบัติเป็นด่าง (pH ประมาณ 12.5) จึงช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากเหล็กเสริมซึ่งอยู่ในเนื้อบล็อกเสริมเหล็ก สมการการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีดังสมการที่ (2.2) และ (2.3)



สำหรับไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) หรือ C_3A แม้จะมีจำนวนน้อยแต่ก็เป็นสารประกอบที่ก่อให้เกิดการก่อตัวเฉียบพลัน ดังนั้นจึงต้องเติมยิปซัมลงไปแก้ไข ผลึกที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยม และมีเจลแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันห่อหุ้มไว้สมการการเกิดปฏิกิริยามีดังสมการที่ (2.4)



และเมื่อใส่ยิปซัมในขั้นตอนการบดเม็ดปูน จะได้สมการที่ (2.5)



2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) อายุของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก ยกเว้นช่วงระยะเวลาเริ่มต้นผสม หลังจากนั้นจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- 2) องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบหลักแต่ละตัวจะแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1
- 3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำได้มาก มีผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา
- 4) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในช่วงเริ่มต้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยาจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยกว่าปกติจะมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง

5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มของอุณหภูมินี้จะต้องไม่ทำให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นร้อยละ 80 ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด [21]

สารประกอบหลัก	ระยะเวลา(วัน)
ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) หรือ C_3S	10
ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) หรือ C_2S	100
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) หรือ C_3A	60
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) หรือ C_4AF	50

2.5 ทราย (Sand)

ทรายเป็นวัสดุที่ใช้มากทั้งในการก่อสร้าง เช่น ใช้ในการประดับสวนหรือสนามปูรองพื้น และปูกระเบื้อง ใช้ถมที่แทนดิน ใช้ในการผสมบล็อก ใช้ผสมกับปูนขาว และปูนซีเมนต์ ทำปูนก่อ และปูนฉาบฝ้าผนัง ใช้ประกอบในการทำหินขัดและหินล้าง ใช้ในการทำซีเมนต์บล็อก ทรายจัดอยู่ในการประเภทหินชั้นซึ่งแตกแยกออกเป็นส่วนละเอียดๆ เล็กๆ อาจจะเป็นการแตกของเปลือกหอยในทะเลและถูกน้ำซัดกลิ้งไปมาจนแตกละเอียดเป็นอนุภาคเล็กๆ เรียกว่า ทราย ดังเช่นที่มีอยู่ตามชายทะเลทั่วไปหรืออาจเป็นก้อนหินที่ไหลมาตามลำธารและกระทบกันแตกออกเป็นส่วนเล็กๆ ถ้ายังโตอยู่ก็เรียกว่า กรวด บางแห่งจะขุดจากในน้ำหรือเป็นบ่อทราย ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีทรายจำนวนมาก

2.5.1 ขนาดของทราย ทรายตามความหมายทั่วไป หมายถึง เม็ดแร่เล็กๆ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ $1/16$ ถึง 2 มิลลิเมตร เท่านั้นถ้าเล็กกว่านี้เรียกว่า ตม (Silt) ถ้าโตกว่าขนาดดังกล่าวก็เรียกว่า กรวด (Gravel) แร่ธาตุที่ประกอบเป็นทรายนั้นส่วนมากเป็นแร่ควอร์ตหรือไมก้า

2.5.2 คุณสมบัติของทราย การที่นำทรายมาใช้ในการก่อสร้าง เช่น ผสมบล็อกหรือผสมทำปูนฉาบนั้นมีเห็นผลดังนี้

- 1) สามารถแทรกเข้าไปอุดช่องว่างของหินในบล็อก ทำให้บล็อกแน่น

2) ช่วยบรรเทาการยืดยืดและแตกร้าวในปูนฉาบ ถ้าปูนฉาบใส่ซีเมนต์มากเกินไป เพื่อลดการแตกร้าว ต้องเพิ่มทรายเข้าไปเพื่อให้มีทางขยายตัว

3) ช่วยเพิ่มปริมาณของส่วนผสม ทำให้ราคาของบล็อกหรือปูนฉาบ ปูนก่อถูกลง เพราะทรายเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายทั่วไป และราคาถูก

2.5.3 แหล่งที่มาของทราย

แหล่งทรายในประเทศไทยเป็นทรายที่ใช้ในการก่อสร้างต่างๆ ไปมีทั้งทรายบกที่ขุดบนพื้นดินและทรายแม่น้ำ เม็ดทรายบกละเอียดกว่าทรายแม่น้ำแต่สกปรกกว่า ทรายหยาบส่วนมากใช้ผสมบล็อกและปูนก่อ มาจากจังหวัดอ่างทอง ราชบุรี และตำบลบ้านเป็งจังหวัดสิงห์บุรี แต่ทรายที่อ่างทองคุณภาพไม่ค่อยดีนักในการใช้ผสมบล็อก ส่วนทรายราชบุรีนั้นว่าใช้ได้ดี ซึ่งขุดมาจากแม่น้ำราชบุรี ทรายบ้านเป็งเป็นทรายที่ดีแต่ขนาดอนุภาคที่ละเอียดไปบ้าง ส่วนทรายละเอียดที่ใช้ในการฉาบปูนนั้นมาจากตำบลบางพูน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา แหล่งทรายที่กล่าวมาแล้ว หมายถึงแหล่งทรายที่ขุดและส่งมาจำหน่ายในกรุงเทพฯ ส่วนที่อื่นๆ ในประเทศนั้นมีอีกมากมาย

2.6 อะลูมิเนียม

ในเปลือกโลกอะลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสามและเป็นโลหะที่มากที่สุด อะลูมิเนียมมีอยู่ทั่วไปเป็นแร่ลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) เช่น ในดินเหนียวแต่การที่จะสกัดเอาอะลูมิเนียมจากดินเหนียวนั้นต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก โลหะอะลูมิเนียมเตรียมได้จากการแยกสลายด้วยไฟฟ้าของอะลูมิเนียมออกไซด์โดยการละลายอะลูมิเนียมออกไซด์ที่บริสุทธิ์ในไครโอไลต์ซึ่งหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส และนำสารละลายนี้ไปแยกสลายด้วยไฟฟ้าในภาชนะเหล็กโดยมีแกรไฟต์เป็นประจุลบและคาร์บอนเป็นประจุบวกจะได้โลหะอะลูมิเนียมที่ขี้ลวและแก๊สออกซิเจนที่ขี้ลวอะลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมินาที่นำมาแยกสลายด้วยไฟฟ้านั้นได้มาจากแร่บอกไซต์ แต่ในแร่มักจะมีสิ่งที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น ซิลิกาเจือปนอยู่บ้างต้องนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยนำแร่มาบดให้ละเอียดและสกัดอลูมินาซึ่งสมบัติเป็นกรดและค้างออกโดยละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อนภายใต้ความดันสูง โลหะอะลูมิเนียมเป็นตัวให้อิเล็กตรอนอย่างแรง คือ ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับปฏิกิริยาทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนได้ แต่เนื่องจากโดยปกติที่ผิวของโลหะอะลูมิเนียมจะเกิดออกไซด์บางๆเคลือบอยู่จึงป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไป

Aluminum Power Method เป็นวิธีที่ใส่สารเคมีให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในเนือบล็อก ทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในเนือบล็อก ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นไปดังสมการที่ (2.6)



2.7 น้ำ

ปริมาณและคุณภาพของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของบล็อก ในที่นี้จะพิจารณาถึงเรื่องคุณภาพของน้ำซึ่งมีความสำคัญมาก เพราะสิ่งเจือปนต่าง ในน้ำอาจจะมีผลต่อคุณสมบัติของบล็อก เช่น กำลังอัดทำให้สีของบล็อกไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น

2.7.1 ความสำคัญของน้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตบล็อกโดยทำหน้าที่ 3 ประการ คือ

- 1) ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- 2) ใช้บ่มบล็อกให้มีกำลังเพิ่มสูงขึ้น
- 3) ใช้ล้างมวลรวม

เราต้องการน้ำที่มีคุณภาพดีและปริมาณที่เหมาะสมในการผลิตบล็อกทุกตัวของน้ำที่ใช้ผสมบล็อก คือ น้ำที่ดื่มได้นับเป็นน้ำที่ใช้ในงานบล็อกได้เสมอ

2.8 ถ้าจากเตาเผาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

กากปูนขาวเป็นของเหลือใช้ที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษซึ่งเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อุตสาหกรรมประเภทนี้ประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ที่สลับซับซ้อน แต่กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการที่ได้กากปูนขาวมี 5 กระบวนการดังนี้

2.8.1 การผลิตเยื่อ

วัตถุประสงค์หลักของการผลิตเยื่อเพื่อต้องการแยกเส้นใยออกมาจากองค์ประกอบอื่นๆ ของไม้การผลิตเยื่อสามารถทำได้หลายวิธีทั้งทางเคมีและทางกลในบางกรณีอาจจะต้องนำไปฟอกให้ขาวเสียก่อน ทำให้ขบวนการในการผลิตเยื่อจึงประกอบด้วยกรรมวิธีการผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อ

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือการแยกเส้นใยให้ออกจากกันโดยอิสระ แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ คือ กระบวนการทางกล กระบวนการทางเคมี และกระบวนการกึ่งเคมี [17]

1) กระบวนการทางกล (Mechanical Pulping)

กระบวนการนี้จะเน้นการบด (Grinding) เพื่อกระจายเส้นใยในเนื้อไม้ให้ออกจากกัน เยื่อไม้บดที่ได้จะมีลักษณะเป็นเยื่อไม้แท่งๆ อยู่มากแต่คุณสมบัติทางด้านความเหนียวของเยื่อไม้ค่อนข้างด้อย เพราะเยื่อที่ได้ยังไม่ใช้เซลลูโลสที่บริสุทธิ์แต่ยังมีสิ่งเจือปน เช่น ลิกนิน เกลือแร่ และยางไม้ เป็นต้น เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้มีปริมาณเยื่อสูงที่สุด 85% ขึ้นไป ปัจจุบันมีการนำสารเคมีมาปรับปรุงคุณภาพของเยื่อ เช่น กระบวนการเคมีแมคคานิคัล (Chemi – Mechanical , CMP) หรือ กระบวนการเทอร์โมแมคคานิคัล (Thermo – Mechanical , TMP) หรือทั้งสองอย่างรวมกันเรียกว่า กระบวนการเคมีเทอร์โมแมคคานิคัล (Chemi –Thermo Mechanical , CTM) โดยเยื่อที่ผลิตได้ด้วยกระบวนการทางกลโดยส่วนใหญ่ จะใช้ในการทำกระดาษหนังสือพิมพ์และทำกระดาษพิมพ์เขียน เพราะมีความทึบแสงสูงและกระดาษกันสำหรับป้องกันสิ่งของแตกภายในกล่องสำหรับในประเทศไทยมีการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการเคมีแมคคานิคัลเพื่อใช้สำหรับผลิตกระดาษไหว้เจ้าเท่านั้น โดยใช้ไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบโดยเริ่มจากการนำไม้ไผ่มาแช่ด้วยโซดาไฟเพื่อให้ไม้เปื่อยต่อจากนั้นจึงนำเข้าสู่เครื่องบดและนำเข้าสู่เครื่องเดินแผ่นกระดาษต่อไป

2) กระบวนการเคมี (Chemical Pulping) กระบวนการทางเคมีเป็นวิธีการผลิตเยื่อโดยใช้สารเคมีละลายสารในเนื้อไม้ที่เป็นตัวยึดเส้นใยที่จับตัวกันไว้ออกมา วิธีการนี้เป็นวิธีการนำวัตถุดิบมาต้มกับสารเคมีที่มีความเข้มข้นสูงในหม้อต้มเยื่อ (Digester) เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีเซลลูโลสสูง มีลิกนินและสารอินทรีย์อื่นๆ ปนอยู่น้อยมากและความเหนียวสูงแต่เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีปริมาณน้อย (ประมาณ 45% - 65%) การผลิตเยื่อด้วยกระบวนการนี้แบ่งออกตามประเภทของสารเคมีที่ใช้ ดังนี้

3) กระบวนการโซดา (Soda Process) เป็นกระบวนการที่ใช้โซดาไฟ (NaOH) เป็นน้ำยาต้มเยื่อกระบวนการนี้นิยมใช้กับไม้เบญจพรรณต่างๆ เมื่อนำเยื่อกระดาษที่ได้นำไปฟอกขาวแล้วจะเหมาะสำหรับทำกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษจดหมาย และกระดาษที่ต้องการความนุ่มฟู

นอกจากนี้ยังเหมาะกับการผลิตกระดาษชนิดพิเศษ เช่น กระดาษสาที่ใช้กระบวนการโซดาในการต้มเยื่อเช่นกัน

- กระบวนการซัลเฟตหรือคราฟท์ (Sulphate or Kraft Process)

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนี้คือโซดาไฟและโซเดียมซัลไฟด์แต่เรียกชื่อ ว่า กระบวนการซัลเฟต เพราะใช้สารเคมีโซเดียมซัลเฟตในการนำน้ำยาเคมีกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการนี้ใช้ได้กับพรรณไม้ทุกชนิด เยื่อซัลเฟตที่ไม่ฟอกส่วนใหญ่ใช้ทำกระดาษห่อของ กระดาษเหนียว (Kraft Paper) กระดาษผิวกล่อง (Kraft Linerboard) ส่วนเยื่อซัลเฟตที่ฟอกขาว ใช้ทำกระดาษได้หลายชนิดตั้งแต่กระดาษพิมพ์เขียนจนถึงกระดาษอนามัย

- กระบวนการซัลไฟต์ (Sulphite Process)

เป็นกระบวนการที่คล้ายกับกระบวนการโซดาเพียงแต่ใช้สารเคมีในการต้มต่างกัน สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนี้ คือ สารละลายไบซัลไฟต์ของแคลเซียม แมกนีเซียมหรือ แอมโมเนีย กระบวนการนี้เหมาะสำหรับทำเยื่อจากพรรณไม้เนื้อแข็ง และพรรณไม้จำพวกหญ้า

4) กระบวนการกึ่งเคมี (Semi-Chemical Pulp) เป็นกระบวนการที่ใช้ กระบวนการผลิตเยื่อทางเคมีและการผลิตเยื่อทางกลรวมกัน เยื่อที่ได้จากกระบวนการผลิตเยื่อวิธีนี้ จะมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างการผลิตเยื่อทางกลและการผลิตเยื่อเคมี วิธีการแยกเส้นใยโดย กระบวนการกึ่งเคมี เป็นการนำชิ้นไม้มาสับและนำไปต้มกับน้ำยาต้มเยื่อ ในหม้อต้มภายใต้เวลา อุณหภูมิ และปริมาณน้ำยาเคมีต่อเยื่อไม้ที่กำหนด เมื่อต้มได้ระยะหนึ่งแล้วก็จะส่งไปยัง กระบวนการทางกล เพื่อแยกเส้นใยออกมา เยื่อที่ได้เรียกว่าเยื่อกึ่งเคมี กระบวนการนี้คล้ายกับ กระบวนการ Chemi-Machanical มากแต่ต่างกันที่ใช้ปริมาณสารเคมีมากกว่า และใช้พลังงานใน การบดเยื่อน้อยกว่าเยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีปริมาณลิกนินอยู่ไม่มากเท่ากับกระบวนการทาง กลปัจจุบันมีโรงงานผลิตเยื่อกระดาษของบริษัท แอดวานซ์ อะโกร จำกัด(มหาชน) และบริษัท เอเอ พัลพ์ มิลล์ 2 จำกัด จังหวัดปราจีนบุรี ได้ผลิตกระดาษโดยใช้กรรมวิธีการผลิตเยื่อแบบซัลเฟตซึ่งใน กระบวนการต้มเยื่อจะใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปูนขาว (แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2) เป็นส่วนผสมของน้ำยาต้มเยื่อ (White liquor) โดยกระบวนการผลิตจะใช้เตาเผาปูนขาว (Lime Kiln) เผาหินปูนดิบ (แคลเซียมคาร์บอเนต, CaCO_3) เมื่อผ่านการเผาก็จะได้ปูนขาว Ca(OH)_2 ออกมาเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการ Causticizing เพื่อผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.8.2 การเตรียมน้ำเยื่อ

ในขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพื่อพัฒนาสัณยภาพของเส้นใย โดยการนำเยื่อไปบดและปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยการผสมหรือใส่สารเพิ่มเติมแตกต่างกันตามอัตราส่วนที่กำหนดส่วนผสมที่ได้นี้เรียกว่า น้ำเยื่อ หรือ สต็อก เยื่อที่นำมาทำกระดาษทุกชนิดจะต้องผ่านการบดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณภาพของเยื่อ

1) ขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อ

- การกระจายเส้นใย (defibering) กระจายเยื่อให้เส้นใยหลุดออกจากกันโดยอิสระในน้ำโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไฮดรอปัลเปอร์ (hydrapulper)
- การบดเยื่อ (refining) บดเยื่อเพื่อให้เส้นใยแตกออกซึ่งเป็นการเพิ่มสัณยภาพพื้นระของเส้นใยให้สูงขึ้นอุปกรณ์ที่ใช้ คือ รีไฟเนอร์ (refining)
- การผสมน้ำเยื่อ (blending) เป็นการเพิ่มสารเติมแต่งลงไปผสมกับเยื่อที่ผ่านการบดแล้วซึ่งเยื่อจะถูกผสมในถังที่เรียกว่า แมชชีนเชสต์ (machine chest)
- การแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำเยื่อ (screening and cleaning) โดยใช้ pressure screen หรือ flat screener เพื่อคัดวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยออกแล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทำความสะอาดเรียกว่า เซนตริฟิวต์กัลป์คลีนเนอร์ (centrifugal cleaner) คัดแยกวัสดุออกไปโดยใช้หลักการความถ่วงจำเพาะ
- การควบคุมความชื้นของน้ำเยื่อ (consistency regulator) เพื่อควบคุมให้น้ำเยื่อมีความเข้มข้นคงที่

2.8.3 การทำแผ่นกระดาษ

หลังจากการผสมน้ำเยื่อเรียบร้อยแล้ว น้ำเยื่อจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องผลิตกระดาษเพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษที่ยาวต่อเนื่องกันซึ่งเรียกว่า เว็บเปเปอร์ (web paper) เครื่องจักรที่ใช้ผลิตกระดาษมีหลายแบบส่วนใหญ่เป็นแบบโฟร์ดรีนเนอร์ (fourdriner) และแบบไซลินเดอร์ (cylinder)

1) ขั้นตอนการผลิตกระดาษ

- การแยกน้ำเยื่อ (draining) โดยใช้ตะแกรงเป็นตัวกรองน้ำเยื่อน้ำจะลอดผ่านตะแกรงทำให้เยื่อก่อตัวเป็นแผ่นเปียก (wet sheet forming)

- การกดน้ำออก (pressing) ทำให้เกิดการยึดแน่นระหว่างเส้นใยภายในกระดาษ (consolidation of wet) มากขึ้น

- การอบกระดาษ (drying) แผ่นกระดาษจะถูกอบให้แห้งและไล่น้ำออกจนกระดาษแห้งเหลือความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 4-6

2) ส่วนประกอบหลักของเครื่องผลิตกระดาษ ได้แก่

- ถังจ่ายเยื่อ (head box) ทำหน้าที่จ่ายน้ำเข้าสู่ตะแกรงลดขณะเดินแผ่น
- ส่วนตะแกรงลดเดินแผ่น (wire section หรือ forming section) ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำหน้าที่กรองและแยกน้ำออก (dewatering) จากแผ่นเปียกและทำหน้าที่ขับเคลื่อนแผ่นเปียกไปยังส่วนต่อไปของเครื่องจักร โดยกระดาษที่ออกจากส่วนนี้จะมีน้ำอยู่ร้อยละ 80

- ส่วนกดกระดาษ (press section) ทำหน้าที่กดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียก ทำให้เกิดการยึดติดแน่นภายในเนื้อกระดาษ กระดาษที่ออกจากส่วนนี้จะมีน้ำอยู่ประมาณ ร้อยละ 55-60 การที่จะเอาน้ำออกมาให้ได้มากกว่านี้ด้วยการใช้แรงกดไม่สามารถทำได้เพราะจะทำให้กระดาษขาด

- ส่วนอบกระดาษ (drying section) ในส่วนนี้จะมีการอบให้ความร้อนกับกระดาษทำให้กระดาษแห้งโดยกระดาษที่ออกมาจากส่วนนี้จะเหลือความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 4-6

- ส่วนรีดกระดาษ (calendar) ทำหน้าที่ปรับแผ่นกระดาษให้เรียบและมีเนื้อแน่นขึ้น แต่ไม่จำเป็นต้องใช้สำหรับกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษชำระ

- ส่วนพับกระดาษเข้าม้วน ทำหน้าที่นำกระดาษเข้าม้วน

2.8.4 การปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษขณะเดินแผ่น

1) การปรับปรุงผิวกระดาษ (surface modification)

กระดาษเมื่อผ่านการอบแห้งแล้วจะเข้าสู่ส่วนรีดกระดาษเพื่อปรับปรุงกระดาษให้เรียบขึ้นและเพิ่มความหนาแน่นของเนื้อกระดาษส่งผลให้กระดาษบางลงนอกจากปรับปรุงผิวกระดาษที่ส่วนนี้ยังสามารถทำการปรับปรุงผิวกระดาษในขณะเดินแผ่นด้วยวิธีการ ฉาบผิว (surface sizing) ซึ่งจะทำการก่อนที่จะเข้าอบโดยใช้น้ำแป้งฉาบบนผิวกระดาษทำให้ผิวกระดาษแข็งแรงสามารถต้านทานการดูดซึมน้ำและการดึงได้ดีซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากของกระดาษที่ใช้พิมพ์

กระดาษที่ผ่านการปรับปรุงลักษณะนี้แก่กระดาษออฟเซต นอกจากนี้กระดาษทิชชูยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้โดยการปรับปรุงเชิงกลซึ่งทำให้เกิดรอยย่น (creping) หรือพิมพ์ลายนูน (embossing) บนผิวกระดาษเพื่อให้กระดาษนุ่มมือขึ้น

2) การเปลี่ยนรูปร่างของม้วนกระดาษ (physical modification)

เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของม้วนกระดาษขณะเดินแผ่นเพื่อให้เหมาะสมกับม้วนกระดาษที่ลูกค้าต้องการ

2.8.5 การแปรรูปกระดาษ

เป็นขั้นตอนการนำกระดาษม้วนไปแปรรูปเป็นแผ่นด้วยการนำไปตัดตามขนาดตามที่ต้องการโดยใช้เครื่องตัดแบ่งม้วนโฟลีโอ (folio sheeter) การแปรรูปเป็นแผ่นกระดาษจะเริ่มขึ้นด้วยการนำม้วนกระดาษมาเข้าสู่เครื่องตัด ซึ่งจะตัดกระดาษเป็นม้วนย่อย 4 ม้วน จากนั้นม้วนกระดาษย่อยจะถูกส่งเข้าสู่ชุดมีดตัด (rotary fly knife) เพื่อตัดกระดาษแต่ละม้วนให้เป็นแผ่นจนได้จำนวนที่ต้องการแล้วจึงนำไปใส่ห่อแต่ละห่อจะมีจำนวนแผ่นระบุไว้อย่างแน่นอน จำนวนที่บรรจุขึ้นอยู่กับการต้องการของลูกค้าและน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ กระดาษแต่ละชนิดจะรอบรรจุม้วนและจัดส่งให้ลูกค้าต่อไป

2.8.6 องค์ประกอบของกากปุนขาว

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากปุนขาวจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษทั้งที่อยู่ ในรูปของแข็งและรูปที่ละลายน้ำได้ [3]

- องค์ประกอบทางเคมีของกากปุนขาวในรูปของแข็ง ทดสอบโดยใช้กากปุนขาว ตากแห้งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากปูนขาวในรูปของแข็งและส่วนที่ละลายน้ำ [21]

ธาตุ	ปริมาณของธาตุในกากปูนขาว	
	ส่วนของแข็ง (ppm)	ส่วนที่ละลายน้ำได้ (ppm)
K	3100	22
Na	12150	7675
Ca	337500	1825
Mg	9100	225
Al	775	50
Fe	850	3
Mn	35	5
Zn	4025	ไม่พบข้อมูล
Cu	8	3
P	881	30

● องค์ประกอบทางเคมีของกากปูนขาวส่วนที่ละลายน้ำได้ ทดสอบโดยการเจือ จาง
กากปูนขาวในน้ำกลั่นแล้วนำเอาของเหลวไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption
Spectrophotometer มีรายละเอียดดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวและกากปูนขาว [21]

ธาตุ	ปริมาณของธาตุชนิดต่างๆ	
	ปูนขาว (ppm)	กากปูนขาว (ppm)
K	3100	22
Mg	12150	7675
Ca	337500	1825
Fe	9100	225
Al	775	50
Na	850	3

● การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนขาว (Lime) และกากปูนขาว (Lime Mud) ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รายละเอียดดังตารางที่ 2-3 (ภาคผนวก ก)

2.9 บล็อกแก้ว

เป็นวัสดุทดแทนผนังบล็อกแก้วเป็นวัสดุโปร่งแสง ซึ่งแสงสามารถให้แสงสว่างผ่านบล็อกแก้วได้ โดยปริมาณแสงที่ผ่าน ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเนื้อแก้ว สดใส สี สัน และประเภทของบล็อกแก้วมีคุณสมบัติทนทานเทียบเท่าผนังอิฐฉาบปูน ดูแลรักษาง่าย สามารถป้องกันเสียง ป้องกันไฟ และป้องกันความร้อน คุ่มค่าด้วย คุณค่าการใช้งานมากกว่าผนัง

2.10 คุณสมบัติบล็อกแก้ว

2.9.1 การรับกำลังอัด (Compressive Strength) [2]

บล็อกแก้วเป็นวัสดุก่อตามมาตรฐาน มอก.1395-2540 โดยสามารถรับกำลังอัดได้ไม่น้อยกว่า 7 Mpa. (71.4 ksc.) ทำให้ก่อผนังบล็อกแก้วได้สูงอย่างน้อย 4 เมตร โดยไม่ต้องมีคานเบรก

2.9.2 น้ำหนักเบา (Light Weight)

น้ำหนักเฉลี่ยของผนังบล็อกแก้ว อยู่ระหว่าง 60-80 kg./sq.m. ซึ่งเบากว่าวัสดุ
ก่อชนิดอื่นที่มี ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เช่น ผนังก่ออิฐมีผลให้ประหยัดโครงสร้างของอาคาร

2.9.3 เป็นฉนวนป้องกันเสียง (Noise Insulator)

จากกระบวนการผลิต ที่ประกบบล็อกแก้วสองซีกด้วยความร้อนภายในจึงเกิด เป็น
ภาวะกึ่งสุญญากาศ สามารถลดความดังของเสียงจากภายนอกได้ถึง 45 เดซิเบล

2.9.4 ป้องกันไฟ (Fire Protection)

บล็อกแก้วสามารถป้องกันไฟไหม้ระดับ G60 – G120 มิให้ไฟผ่านสู่ผนังอีกด้านไม่
น้อย กว่า 60 – 120 นาที ตามมาตรฐาน Din. 4102 และเป็นฉนวนป้องกันความร้อน เนื่องจากบล็อก
แก้วถูกประกบกันจากบล็อกแก้ว 2 ซีกด้วยความร้อนสูงทำให้ช่องว่าง ภายในเป็นภาวะกึ่ง
สุญญากาศ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนในการป้องกันความร้อน

2.9.5 คุณสมบัติการควบคุมแสง

การส่องผ่านของแสงแบ่งได้ตามประเภทคือ แบบ Transparent ให้แสงผ่าน
75% แบบ non-transparent 50-70% แบบ Color 40%

2.9.6 ป้องกันการควบแน่นของละอองน้ำ

คุณสมบัติการเป็นฉนวนป้องกันความร้อน ป้องกันไม่ให้ความชื้นจากภายนอก
กลั่นตัวเป็นละอองน้ำเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ระหว่างผนังภายในกับภายนอก ทำให้ผนังไม่
เกิดฝ้า และไม่เกิดคราบสกปรกที่เกิดจากฝุ่นละออง รวมตัวกับละอองน้ำ



รูปที่ 2.1 บล็อกแก้ว

บทที่ 3

วิธีดำเนินงาน

3.1 แผนการดำเนินงาน

1) ศึกษาและรวบรวมข้อมูลกระบวนการผลิตปลีอกมวลเบาแบบมีฟองอากาศ (แบบไม่อบไอน้ำ)

2) เตรียมอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาตามที่กำหนด โดยมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์
 1 ส่วน เถ้าเผาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษเย็บขั้ม 1 ส่วน ผงอะลูมิเนียม ทราย น้ำ สารกักกระจาย
 ฟองอากาศ เป็นสำคัญ นำมาหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าทรงลูกบาศก์มาตรฐาน ใช้วิทยาการด้านคอนกรีต
 เทคโนโลยีเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต โดยมีสารกักกระจายฟองอากาศเป็นตัวช่วย
 แล้วทำการบ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน ในแต่ละส่วนผสมดังตารางที่ 3.1

3) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อเตรียมไว้ นำมาตรวจสอบสภาพความคงตัวทดสอบค่าความหนาแน่นและทดสอบค่ากำลังอัดประลัยที่อายุบ่มต่างๆ

4) เมื่อได้ทดสอบอัตราส่วนทั้งหมดแล้ว จึงเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจำนวน 1 อัตราส่วน นำมาออกแบบส่วนผสมอัตราระหว่างปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียม ดังตาราง 3.3

5) ปมที่ตัวอย่างมอร์ด้าระหว่างปฏิกิริยาเมตกับผงอะลูมิเนียมที่อายุ 28 วัน

6) นำก้อนตัวอย่างมอร์ต้าระหว่างปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียมที่หล่อเตรียมไว้มาตรวจสอบความคงตัวทดสอบหาค่าความหนาแน่นและทดสอบค่ากำลังอัดประลัยที่อายุบ่มต่างๆ

7) เมื่อได้ทดสอบอัตราส่วนมอร์ตาร์ดระหว่างปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียมทั้งหมดแล้ว จึงเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจำนวน 1 อัตราส่วน นำมาออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ดระหว่างปูนซีเมนต์กับกากอุตสาหกรรม ดังตาราง 3.2

8) บ่มที่ตัวอย่างมอร์ต้าระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าจากเตาเผาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ
ที่อายุ 28 วัน

9)นำก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ดระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าจากเตาเผาจากอุตสาหกรรมผลิต
กระดาษที่หล่อเตรียมไว้นำมาตรวจสอบคุณภาพความคงตัวทดสอบหาค่าความหนาแน่นและทดสอบค่า
กำลังอัดประลัยที่อายุบ่มต่างๆ

10) เมื่อได้ทดสอบอัตราส่วนทั้งหมดแล้ว จึงเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจำนวน 1 อัตรา
ทดลองในแบบขนาด 7.5x 15 x15 ซม. ที่เตรียมไว้

11) นำตัวอย่างขนาด 7.5x 15 x15 ซม. ที่เตรียมไว้ส่งทดสอบค่าการทนไฟตามมาตรฐาน มยผ. 8205 - 51

12) เทตัวอย่างส่วนผสมที่ได้จากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15 และ ปูนซีเมนต์ และ ได้จากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

13) นำตัวอย่างอัตราส่วนร้อยละ 10, 15 และ ปูนซีเมนต์ และ ได้จากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษส่งทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

14) เมื่อได้ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์นำค่า (K) 10%ได้จากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษมาคำนวณค่า OTTV ของการเสริมบล็อกแก้วที่ร้อยละ 0, 25, 50, 75, และ 100 โดยปริมาตร

15) วิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้โดยใช้หลักทางสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้น พิจารณาคูณสมบัติต่างๆ โดยเฉลี่ยของบล็อกคอนกรีตมวลเบาและบล็อกแก้ว เทียบกับค่าเกณฑ์มาตรฐานทั่วไป หาค่าผันแปร จัดทำบทสรุปและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมแนวทางในการวิจัยเพิ่มเติม



ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	ทราย	กากอุตสาหกรรม	ยิปซัม	ผง อะลูมิเนียม	น้ำ
1	Mix 1	30%	50%	18%	0%	2%	0.8
2	Mix 2	35%	50%	15%	0%	2%	0.8
3	Mix 3	30%	40%	28%	0%	2%	0.8
4	Mix 4	35%	50%	24%	0%	1%	0.8
5	Mix 5	30%	50%	9%	9%	2%	0.8
6	Mix 6	30%	50%	13%	5%	2%	0.8
7	Mix 7	30%	50%	10%	9.75%	0.25%	0.8
8	Mix 8	30%	50%	10%	9.50%	0.50%	0.8
9	Mix 9	30%	50%	10%	9.25%	0.75%	0.8

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าจากเตาเผากากอุตสาหกรรมผลิต
กระดาษ

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	ทราย	กากอุตสาหกรรม	ยิปซัม	ผง อะลูมิเนียม	น้ำ
1	Mix LL1	40%	50%	0%	9%	1%	0.8
2	Mix LL2	35%	50%	5%	9%	1%	0.8
3	Mix LL3	30%	50%	10%	9%	1%	0.8
4	Mix LL4	25%	50%	15%	9%	1%	0.8
5	Mix LL5	30.25%	50%	10%	9%	0.75%	0.8
6	Mix LL6	35.25%	50%	15%	9%	0.75%	0.8

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าระหว่างปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียม

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	ทราย	กากอุตสาหกรรม	ยิปซัม	ผงอะลูมิเนียม	น้ำ
1	Mix AL1	32%	50%	9%	9%	0%	1
2	Mix AL2	31.5%	50%	9%	9%	0.5%	1
3	Mix AL3	31%	50%	9%	9%	1%	1
4	Mix AL4	30.5%	50%	9%	9%	1.5%	1
5	Mix AL5	30%	50%	9%	9%	2%	1

3.2 เครื่องมือ

3.2.1) วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2) ทราขหายาบร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30



รูปที่ 3.2 ทราขหายาบร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30

3) ถ้ำจากเตาเผาากอตุสาหกรรมผลิตกระดาษ



รูปที่ 3.3 ถ้ำจากเตาเผาากอตุสาหกรรมผลิตกระดาษ

4) ผงอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.4 ผงอะลูมิเนียม

5) บล็อกแก้ว ขนาด 19x19x7.5 ซม.



รูปที่ 3.5 บล็อกแก้ว ขนาด 19x19x7.5 ซม.

6) ผงยิปซัม



รูปที่ 3.6 ผงยิปซัม

7) น้ำประปา



รูปที่ 3.7 น้ำประปา

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) ตาชั่ง



รูปที่ 3.8 ตาชั่ง

2) เครื่องผสมบด



รูปที่ 3.9 เครื่องผสมบด

- 3) แบบหล่อขนาด 5x5x5 ซม. , 7.5x15x15 ซม. และ 7.5x30x30 ซม.



รูปที่ 3.10 แบบหล่อขนาด 5x5x5 ซม.

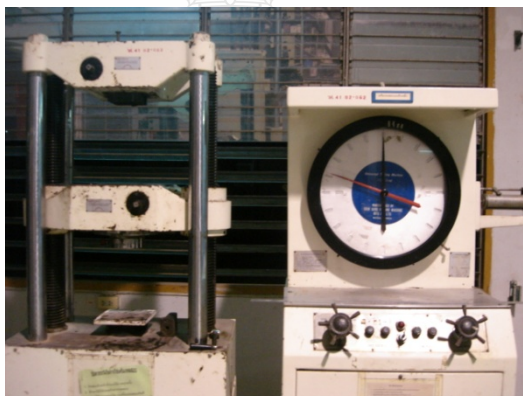


รูปที่ 3.11 แบบหล่อขนาด 7.5x 15 x15 ซม.



รูปที่ 3.12 แบบหล่อขนาด 7.5x30x30 ซม.(2ก้อน)

4) เครื่องทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบกำลังอัด

5) เครื่องสว่านแท่น



รูปที่ 3.14 เครื่องสว่านแท่น

6) เครื่องเลื่อยฉลุไฟฟ้า (จิ๊กซอว์)



รูปที่ 3.15 เครื่องเลื่อยฉลุไฟฟ้า (จิ๊กซอว์)

7) เตาเผาชนิดเตาแก๊ส



รูปที่ 3.16 เตาเผาชนิดเตาแก๊ส

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างมอดาร์

- 1) ทำการผสมส่วนผสมปูนซีเมนต์ ทราย กากอุตสาหกรรม ยิปซัม ผงอะลูมิเนียม เข้าด้วยกัน
- 2) เติมน้ำลงในส่วนผสม ผสมให้เข้ากัน
- 3) เทส่วนผสมลงในแบบรอบจนวน 24 ซม. จึงแกะตัวอย่างออกจากแบบ
- 4) นำก้อนตัวอย่างไปบ่มเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน
- 5) เมื่อบ่มได้เวลาที่ต้องการจึงนำก้อนตัวอย่างมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ที่กำหนดไว้

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อส่งทดสอบความทนไฟและทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(K)

- 1) ทำการผสมส่วนผสมปูนซีเมนต์ ทราย กากอุตสาหกรรม ยิปซัม ผงอะลูมิเนียม เข้าด้วยกัน
- 2) เติมน้ำลงในส่วนผสม ผสมให้เข้ากัน
- 3) เทส่วนผสมลงในแบบขนาด 15x15x7.5 cm. รอบจนวน 24 ซม. จึงแกะตัวอย่างออกจากแบบ

4) เมื่อปมได้เวลาที่ต้องการจึงนำก้อนตัวอย่างไปส่งทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ที่กำหนดไว้

3.3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

สารตัวอย่างที่ใช้ในการวัดด้วยเทคนิค XRFS มีอยู่ 3 ประเภทด้วยกันคือ

1) สารตัวอย่างที่เป็นผง (Powder Samples) ต้อง Homogeneous ให้เป็นเนื้อเดียวกันขนาดของอนุภาคประมาณ 20 ไมโครเมตร สารตัวอย่างประเภทนี้สามารถใช้ Surface Probe ในการวัดได้

2) สารตัวอย่างที่เป็นของเหลว (Liquid Samples) สารตัวอย่างประเภทนี้ง่ายต่อการวัดโดยการใช้ Sample Cups

3) สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง (Solid Samples) สารตัวอย่างประเภทนี้สามารถทำการวัดด้วย Sample Probe โดยตรงได้

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การทดสอบหาความหนาแน่นเชิงปริมาตร

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร
- เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 กรัม
- ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 105 องศาเซลเซียส ± 5 องศาเซลเซียส

เซียส

2) วิธีการทดสอบ

- ตัดชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่าง $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 มิลลิเมตร
- วัดปริมาตรและมวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) การรายงานผล

รายงานค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของชิ้นทดสอบแต่ละค่าและค่าเฉลี่ยจากสูตรดังสมการที่ (3.1)

$$\text{ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง} = \frac{\text{มวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ}}{\text{ปริมาตรชิ้นทดสอบ}} \quad (3.1)$$

3.4.2 การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 กรัม
- เครื่องกดที่อ่านค่าได้ละเอียดถึง 1 นิวตัน และสามารถควบคุมอัตราการเพิ่มแรงอัดได้ 0.05 ถึง 0.2 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที
- ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 105 องศาเซลเซียส ± 5 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิให้ไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส สำหรับการอบหาปริมาณความชื้นอยู่ในเกณฑ์ร้อยละ 10 ± 2

2) วิธีการทดสอบ

- ตัดชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งตอนบนตอนกลางและตอนล่างของก้อนบล็อกรูปขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 มิลลิเมตร ทำเครื่องหมายแสดงด้านความยาวของตัวอย่างทำการทดสอบเมื่อขึ้นทดสอบมีปริมาณความชื้นร้อยละ 10 ± 2
- ให้กดชิ้นทดสอบตามที่ระบุไว้ใน มอก. 109 โดยใช้อัตราการเพิ่มแรงอัดตามตารางที่ 3.4 ในแนวตั้งฉากกับด้านยาวของชิ้นทดสอบจนได้ค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อขึ้นทดสอบแตกเสียหาย

3) การรายงานผล

รายงานค่าความต้านทานแรงอัดของชิ้นทดสอบและค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 3.4 อัตราการเพิ่มแรงอัด

ชั้นคุณภาพ	อัตราการเพิ่มแรงอัด (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที)
2	0.05
4	0.1
6	0.15
8	0.2

3.4.3 การทดสอบความทนไฟ

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

- เตาเผาชนิดแก๊ส
- ตัววัดอุณหภูมิ

2) วิธีการทดสอบ

- นำชิ้นตัวอย่างเข้าวางในเตาเผาชนิดเตาแก๊ส
- ก่อนที่จะนำไปเผาในเตาต้องเผาขึ้นตัวอย่างก่อนซึ่งเป็นการไล่ความชื้นใน

แห้งทดสอบเพื่อป้องกันการระเบิดของตัวอย่างทดสอบ

- หลังจากนั้นจึงค่อยนำไปเผาในเตาเผาโดยให้อุณหภูมิอิสระและบันทึกค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ทุกช่วง 5 นาที หรือน้อยกว่า สำหรับช่วงการทดสอบ 120 นาทีแรก และ ทุกช่วง 10 นาที หรือน้อยกว่า สำหรับช่วงการทดสอบหลังจาก 120 นาทีแรกทดสอบทั้งหมด 4 ชั่วโมง

3) การรายงานผล

สรุปตามมาตรฐาน มยผ. 8205 - 51

3.4.4 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(K)

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(K)

2) วิธีการทดสอบ

- วัดขนาดชิ้นส่วนตัวอย่าง
- นำชิ้นงานตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(K) โดย

ให้อุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส

- นำค่าที่ได้เข้าโปรแกรม OTTV เพื่อสรุปผลที่ได้

3) การรายงานผล

รายงานค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(K)ของชิ้นทดสอบและค่าเฉลี่ย

3.4.5 การทดสอบค่า X-ray Florescent

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่อง X-rays Source ซึ่งการเลือกใช้ Source ว่าธาตุที่จะ วิเคราะห์อยู่ใน

Range ของ Source ไດ

2) วิธีการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์

ในการวัด X-rays Fluorescence Intensity ที่เกิดจากธาตุที่ทำการวิเคราะห์ด้วย

ดีเทคเตอร์ ผลที่ได้จากการวัดจะเป็น Count-Rate (CPM หรือ CPS) ซึ่งจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ ความเข้มข้นของธาตุนั้นในตัวอย่าง การวัด ความเข้มของรังสีเอ็กซ์นี้จัดว่าเป็นการวัดแบบสุ่ม (Random) ดังนั้นความผิดพลาดของค่าที่วัดได้ขึ้นอยู่กับ Count-Rate เพื่อลด ความผิดพลาด ให้ เหลือน้อยที่สุด ควรจะต้องนำเอาหลักการทางสถิติเข้าไปใช้ในการวัดรังสีด้วย เรียกความสัมพันธ์นี้ ว่า สถิติกับ การวัด รังสีเอ็กซ์ (Counting Statistics)



บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของบล็อกคอนกรีตมวลเบา

4.1.1 กำลังรับแรงอัด

จากการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตมวลเบาเมื่อแทนปูนซีเมนต์ด้วยผงอะลูมิเนียมตามอัตราส่วนร้อยละ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่มีอายุ 28 วัน จะมีกำลังลดลง ซึ่งมีความสามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 51.87, 47.20, 46.00, 45.20 และ 44.93 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ อัตราส่วนผสมซึ่งส่วนผสมที่มีค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.1505-2541 ชั้นคุณภาพที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คือส่วนผสมที่ผสม ผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0.0 แต่เนื่องจาก ส่วนผสมนี้มีน้ำหนักที่หนักกว่าส่วนผสมอื่นจะทำให้ไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทำวิจัยจึงได้เลือกส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือส่วนผสมผงอะลูมิเนียม 2.0 เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบาแต่กำลังอัดไม่ได้้อยู่ตามเกณฑ์มาตรฐาน

จากการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตมวลเบาเมื่อแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าจากเตาเผาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษในอัตราส่วนร้อยละ 0.0, 5.0, 10.0 และ 15.0 ที่มีอายุ 28 วัน จะมีกำลังลดลง ซึ่งมีความสามารถรับกำลังอัดได้เท่ากับ 47.60, 44.93, 45.87 และ 44.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับอัตราส่วนผสม ซึ่งส่วนผสมที่พิจารณาคือส่วนผสมที่แทนที่เถ้าจากเตาเผาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์ที่น่าจะพิจารณาจากองค์ประกอบอื่น ๆ ด้วย

เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมในด้านการรับแรงอัด พบว่าส่วนผสม LL 3 เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด สาเหตุที่กำลังรับแรงอัดลดลงตามอัตราส่วนของเถ้าจากเตาเผาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากมวลรวมที่มีอนุภาคเป็นฝุ่นผงจำนวนมากในกากปูนขาว ซึ่งฝุ่นผงเหล่านี้จะเคลือบติดกับผิวของมวลรวมทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของซีเมนต์เพสต์ลดลงและทำให้ต้องใช้ น้ำมากกว่าปกติในการผสมมอร์ตาร์การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีผลต่อกำลังรับแรงอัด [10] ระบุว่าน้ำจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์

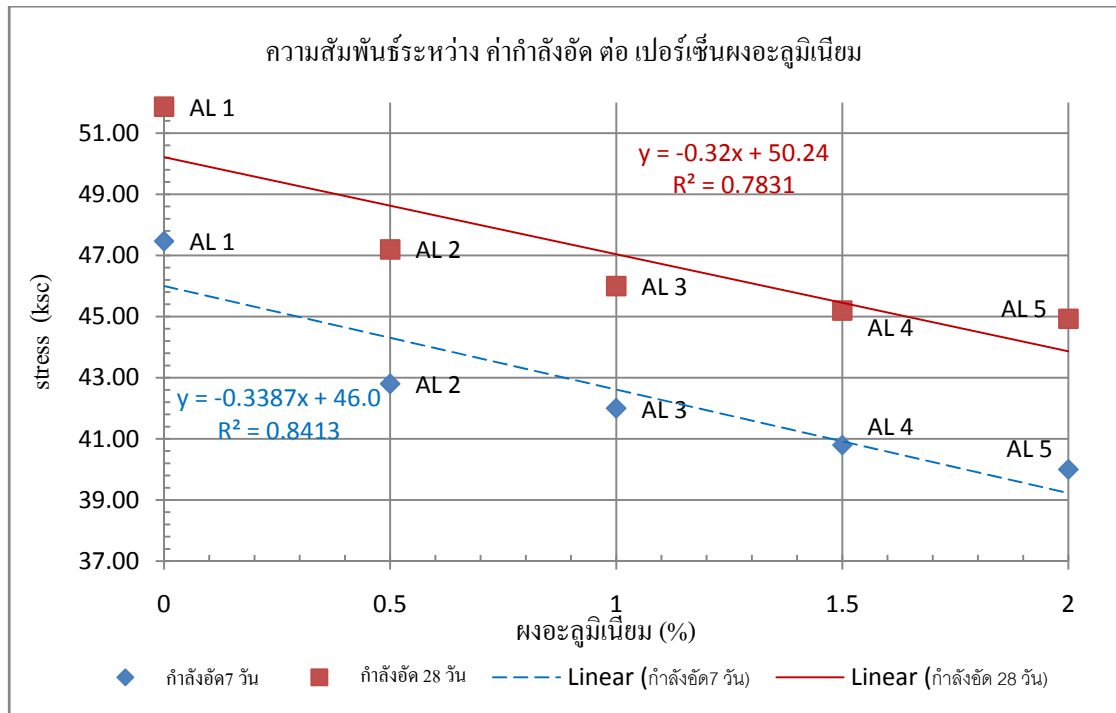
ทำให้การจับยึดกันไม่แน่นหนาและเมื่อมอร์ตาร์แข็งตัวแล้วน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาเคมีระเหยไปทำให้มอร์ตาร์มีโพรงพรุนจำนวนมาก

ตารางที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่างปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียม

ส่วนผสม	อัตราส่วน โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์:ทราย:ยิปซั่ม: เถ้าจากอุตสาหกรรม:ผงอะลูมิเนียม	กำลังอัด ที่อายุ 7 วัน (kgf)	กำลังอัดเฉลี่ย ที่อายุ 7 วัน (ksc)	กำลังอัด ที่อายุ 28 วัน (kgf)	กำลังอัดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน (ksc)
mixA11	32% : 50% : 9% : 9% : 0% W/C = 0.80	1180	47.47	1290	51.87
		1210		1320	
		1170		1280	
mixA12	31.5% : 50% : 9% : 9% : 0.5% W/C = 0.80	1070	42.80	1180	47.20
		1080		1170	
		1060		1190	
mixA13	31% : 50% : 9% : 9% : 1% W/C = 0.80	1000	42.00	1120	46.00
		1100		1190	
		1050		1140	
mixA14	30.5% : 50% : 9% : 9% : 1.5% W/C = 0.80	1030	40.80	1150	45.20
		1020		1110	
		1010		1130	
mixA15	30% : 50% : 9% : 9% : 2% W/C = 0.80	990	40.00	1100	44.93
		1010		1120	
		1000		1150	

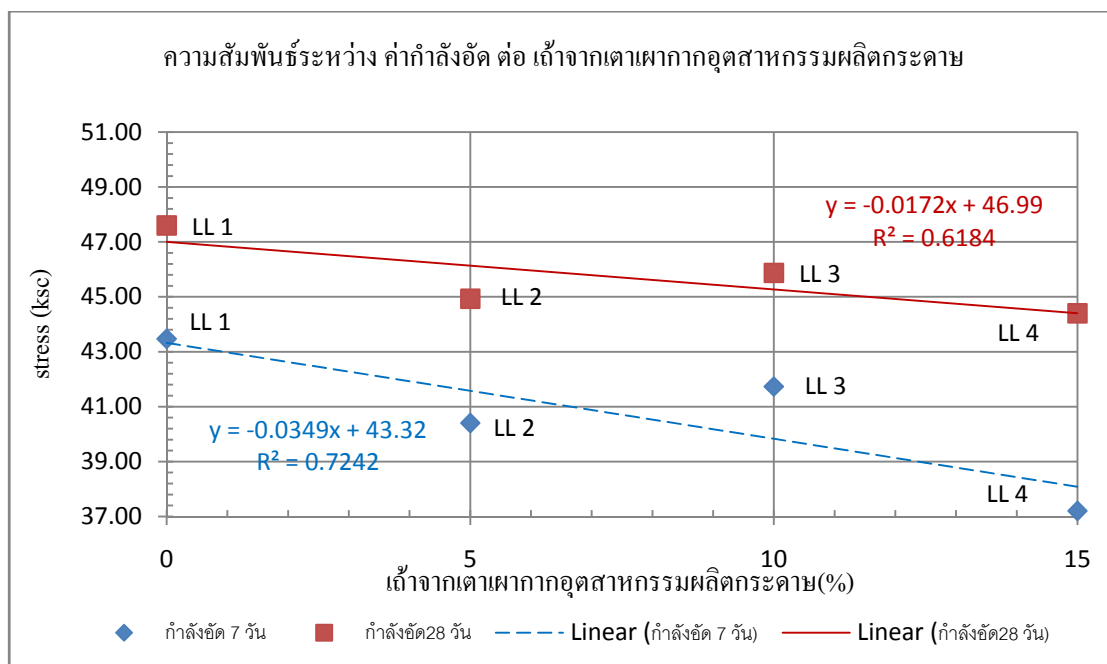
ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าจากเตาเผากาก
อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

ส่วนผสม	อัตราส่วน โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์:ทราย:ขี้ปั้ง: เถ้าจากอุตสาหกรรม:ผงอะลูมิเนียม	กำลังอัด ที่อายุ 7 วัน (kgf)	กำลังอัดเฉลี่ย ที่อายุ 7 วัน (ksc)	กำลังอัด ที่อายุ 28 วัน (kgf)	กำลังอัดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน (ksc)
mixLL 1	39% : 50% : 9% : 0% : 2% W/C = 0.80	1150	43.47	1270	47.60
		1020		1130	
		1090		1170	
mixLL 2	34% : 50% : 9% : 5% : 2% W/C = 0.80	1030	40.40	1150	44.93
		1020		1130	
		980		1090	
mixLL 3	29% : 50% : 9% : 10% : 2% W/C = 0.80	920	41.73	1040	45.87
		1120		1210	
		1090		1190	
mixLL 4	24% : 50% : 9% : 15% : 2% W/C = 0.80	1190	37.20	1310	44.40
		800		1020	
		800		1000	



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเปอร์เซ็นต์ผงอะลูมิเนียม

จากกราฟได้ค่าความเชื่อถือเท่ากับ 0.8413 และ 0.7831 จะเห็นว่าเมื่อใส่ผงอะลูมิเนียม 2% จะให้กำลังอัดต่ำแต่เหตุผลที่เลือกใช้ผลอะลูมิเนียมเพราะทำให้น้ำหนักเบาแต่ถ้าใส่มากกว่านี้จะทำให้ค่าใช้จ่ายมากขึ้น



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเปอร์เซ็นต์เถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

จากกราฟได้ค่าความเชื่อถือเท่ากับ 0.7242 และ 0.6184 แสดงกำลังอัดที่ 7 วันทราบว่าใส่เถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่ 10% = 41.73 (ksc) จะให้กำลังอัดดีที่สุดเช่นกันกับเส้นแสดงกำลังอัดที่ 28 วัน ให้กำลังอัด = 45.87 (ksc) จะเห็นว่าเถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่ร้อยละ 5 และ 15 จะให้กำลังอัดต่ำแต่ถ้าหากใส่เถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษมากกว่า 15% จะทำให้ตัวอย่างอยู่ไม่เกาะเป็นเนื้อเดียวกัน

4.1.2 ค่าความหนาแน่นแห้ง

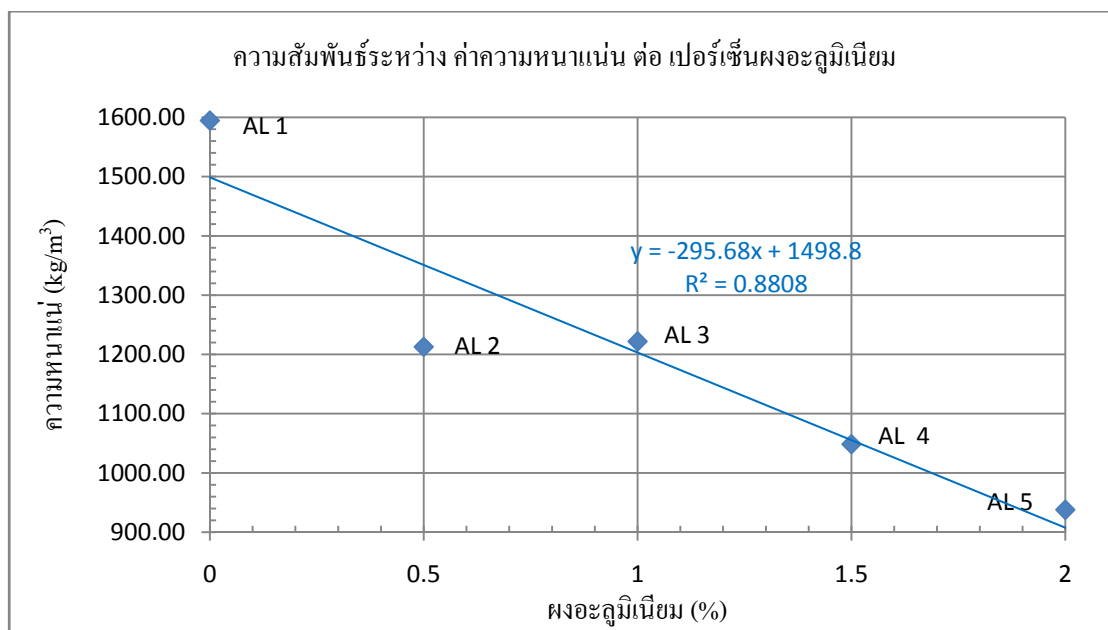
จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของบล็อกมวลเบาขึ้นอยู่กับปริมาณของกาปูนขาวนั่นคือเมื่อปริมาณเถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและจากส่วนผสมเกือบทั้งหมดที่ได้ทำการทดลอง พบว่ามีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่ามาตรฐานตาม มอก. 1505-2541ชั้นคุณภาพที่ 2 คือ มีค่ามากกว่า 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับส่วนผสมที่เลือกคือส่วนผสม LL 3 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1238.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่อย่างไรก็ตามในการเพิ่มเถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ลักษณะของส่วนผสมนั้นมีการจับตัวของส่วนผสมที่น้อยมาก

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่าง ปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียม

ส่วนผสม	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์:ทราย:ขี้ปั้ง:เถ้าจากอุตสาหกรรม :ผงอะลูมิเนียม	น้ำหนักอิมตัว ผิวแห้ง (g.)	ความหนาแน่น kg/m^3
mixA11	32% : 50% : 9% : 9% : 0% W/C = 0.80	202.70	1594.67
		195.80	
		199.50	
mixA12	31.5% : 50% : 9% : 9% : 0.5% W/C = 0.80	145.90	1212.80
		160.70	
		148.20	
mixA13	31% : 50% : 9% : 9% : 1% W/C = 0.80	151.70	1221.87
		153.40	
		153.10	
mixA14	30.5% : 50% : 9% : 9% : 1.5% W/C = 0.80	158.40	1290.13
		163.10	
		162.30	
mixA15	30% : 50% : 9% : 9% : 2% W/C = 0.80	123.20	937.60
		124.50	
		103.90	

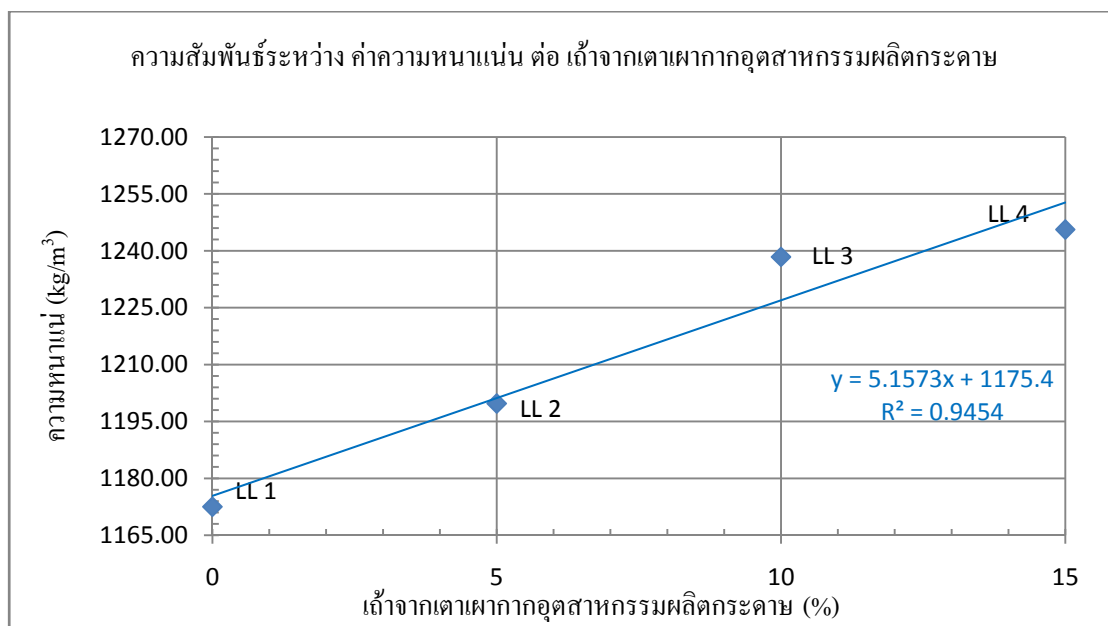
ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าจากเตาเผาจาก
อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

ส่วนผสม	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์:ทราย:ขี้ปั้ง:เถ้าจากอุตสาหกรรม :ผงอะลูมิเนียม	น้ำหนักก้อนตัว ผิวแห้ง (g.)	ความหนาแน่น kg/m^3
mixLL 1	39% : 50% : 9% : 0% : 2% W/C = 0.80	151.90	1172.53
		148.70	
		139.10	
mixLL 2	34% : 50% : 9% : 5% : 2% W/C = 0.80	154.70	1199.73
		156.10	
		139.10	
mixLL 3	29% : 50% : 9% : 10% : 2% W/C = 0.80	138.10	1238.40
		162.20	
		164.10	
mixLL 4	24% : 50% : 9% : 15% : 2% W/C = 0.80	173.10	1245.60
		148.90	
		145.10	



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์ผงอะลูมิเนียม

จากกราฟได้ค่าความเชื่อถือเท่ากับ 0.8808 และจะเห็นได้ว่าที่ผงอะลูมิเนียมร้อยละ 2 มีความหนาแน่นน้อยเพราะขนาดเทคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมากจึงทำให้ความหนาแน่นต่ำลง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์เถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมเถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษจะทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของเถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่เพิ่มขึ้น เหตุผลที่เลือกเถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่ร้อยละ 10 เพราะถ้าใส่เถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมมากกว่านี้ก้อนตัวอย่างจะยุบยัดเกาะกันไม่ดีไม่สามารถนำไปใช้ได้

4.1.3 ค่าการดูดซึมน้ำ

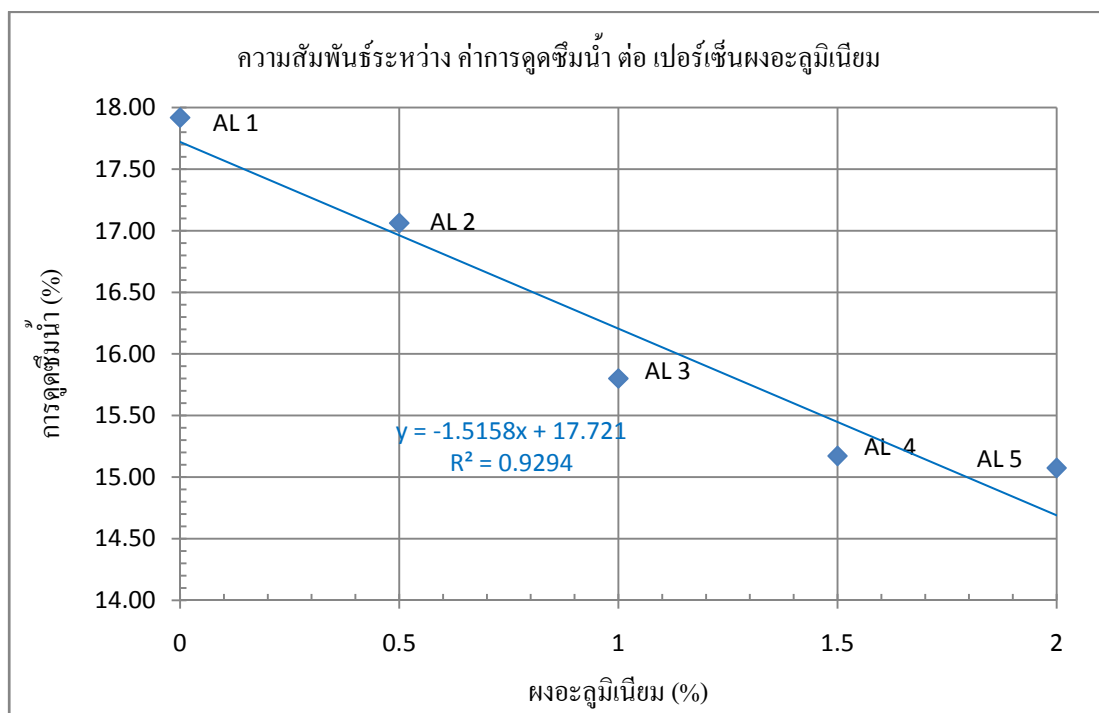
จากการทดลองพบว่าการดูดซึมน้ำของบล็อกมวลเบา ขึ้นอยู่กับปริมาณอัตราส่วนของเถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของเถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่เพิ่มเข้าไป ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 12.67 ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคของเถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่เกิดจากฟองอากาศ ส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกมวลเบาที่อายุ 28 วัน มีคุณภาพการดูดซึมน้ำสูงกว่ามาตรฐานตามอก. 150-2541 ชั้นคุณภาพที่ 2 และ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 12.67

ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่างปูนซีเมนต์กับผงอะลูมิเนียม

ส่วนผสม	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์:ทราย:ยิปซั่ม:เถ้าจากอุตสาหกรรม :ผงอะลูมิเนียม	น้ำหนักก้อนตัว ผิวเปียก (g.)	น้ำหนักก้อนตัว ผิวแห้ง (g.)	ค่าการดูดซึม เฉลี่ย %
mixA1 1	32% : 50% : 9% : 9% : 0% W/C = 0.80	240.40	202.70	17.92
		233.21	195.80	
		231.54	199.50	
mixA1 2	31.5% : 50% : 9% : 9% : 0.5% W/C = 0.80	169.00	145.90	17.06
		189.00	160.70	
		174.40	148.20	
mixA1 3	31% : 50% : 9% : 9% : 1% W/C = 0.80	175.40	151.70	15.80
		177.80	153.40	
		177.40	153.10	
mixA1 4	30.5% : 50% : 9% : 9% : 1.5% W/C = 0.80	182.40	158.40	15.17
		187.70	163.10	
		187.10	162.30	
mixA1 5	30% : 50% : 9% : 9% : 2% W/C = 0.80	137.60	123.20	15.07
		136.80	124.50	
		130.20	103.90	

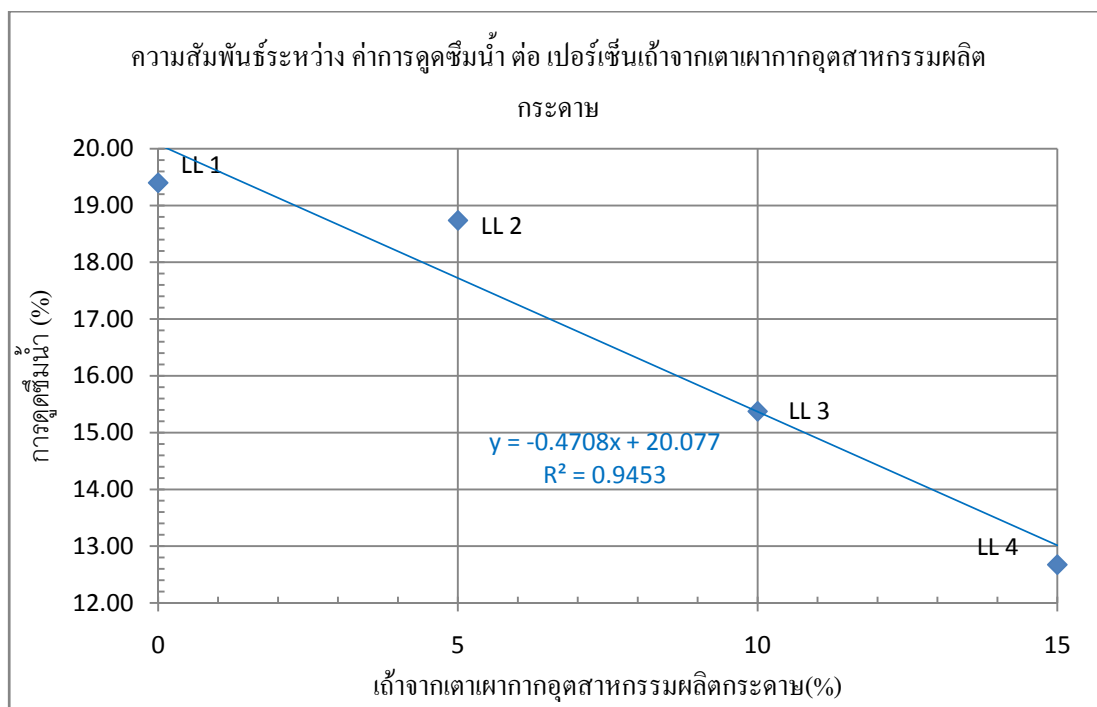
ตารางที่ 4.6 ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกคอนกรีตมวลเบาระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าจากเตาเผากาก
อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

ส่วนผสม	อัตราส่วน โดยปริมาตร ปูนซีเมนต์:ทราย:ขี้ปั้ง:เถ้าจากอุตสาหกรรม :ผงอะลูมิเนียม	น้ำหนักก้อนตัว ผิวแห้ง (g.)	ความหนาแน่น kg/m^3	ค่าการดูดซึม %
mixLL 1	39% : 50% : 9% : 0% : 2% W/C = 0.80	182.00	151.90	19.40
		178.40	148.70	
		164.60	139.10	
mixLL 2	34% : 50% : 9% : 5% : 2% W/C = 0.80	180.40	154.70	18.74
		182.10	156.10	
		171.70	139.10	
mixLL 3	29% : 50% : 9% : 10% : 2% W/C = 0.80	159.10	138.10	15.37
		187.20	162.20	
		189.50	164.10	
mixLL 4	24% : 50% : 9% : 15% : 2% W/C = 0.80	194.50	173.10	12.67
		168.10	148.90	
		163.70	145.10	



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำกับเปอร์เซ็นต์ผงอะลูมิเนียม

จากกราฟมีค่าความเชื่อถือว่า 0.9294 และแสดงค่าการดูดซึมน้ำจะลดลงตามเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของผงอะลูมิเนียมเมื่อใส่ผงอะลูมิเนียมร้อยละ 2 ค่าการดูดซึมน้ำต่ำเป็นค่าที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำกับเปอร์เซ็นต์กากปูนขาว

จากกราฟมีค่าความเชื่อถือเท่ากับ 0.9453 และแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่เถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ร้อยละ 10 ค่าการดูดซึมน้ำค่าจะเห็นว่าที่เถ้าจากเตาเผาากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ร้อยละ 15 ค่าการดูดซึมน้ำค่าแต่เนื้อตัวอย่างอยู่ไม่เกาะเป็นเนื้อเดียวกัน

4.1.4 ค่าการถ่ายเทความร้อน

จากการนำตัวอย่างไปทำการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการแยกส่วนผสมออกดังนี้

ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ อัตราส่วน ปูนซีเมนต์:ทราย:ขี้ปิ้ง:ผงอะลูมิเนียม ได้ค่า ส.ป.ส การนำความร้อนเฉลี่ย 0.6837 w/mk (รูปที่ 4-7)

กากปูนขาว อัตราส่วน เถ้าจากอุตสาหกรรม:ทราย:ขี้ปิ้ง:ผงอะลูมิเนียม ได้ค่า ส.ป.ส การนำความร้อนเฉลี่ย 0.2640 w/mk (รูปที่ 4-7)

ผสมกากปูนขาวร้อยละ 10 อัตราส่วน ปูนซีเมนต์:เถ้าจากอุตสาหกรรม:ทราย:ขี้ปิ้ง:ผงอะลูมิเนียม ได้ค่า ส.ป.ส การนำความร้อนเฉลี่ย 0.2143 w/mk (รูปที่ 4-7)

ผสมกากปูนขาวร้อยละ 15 อัตราส่วน ปูนซีเมนต์:เถ้าจากอุตสาหกรรม:ทราย:ขี้ปิ้ง:ผงอะลูมิเนียม ได้ค่า ส.ป.ส การนำความร้อนเฉลี่ย 0.6283 w/mk (รูปที่ 4-7)

สรุปได้ว่าการผสมเถ้าจากอุตสาหกรรมเข้าไปแทนที่ ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วน 10% ค่า ส.ป.ส การนำความร้อนที่ดีที่สุด เฉลี่ยเท่ากับ 0.2143 w/mk ซึ่งเปรียบเทียบจากการเพิ่มเถ้าจาก อุตสาหกรรมเข้าไปที่ 15% กลับมีค่า ส.ป.ส การนำความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นจึงเลือกใช้อัตรา ส่วนผสมที่ร้อยละ 10 เพื่อเพิ่มมูลค่า โดยเสริมกรอบแก้วไปเป็นจำนวนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนดังตารางที่ 4-9 คือเมื่อเพิ่มบล็อกแก้วเข้าไปในอัตราส่วนที่กำหนดไว้บอก ได้ว่าเมื่ออัตราส่วนบล็อกแก้วเพิ่ม ค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังอาคาร มีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4-8 โดยการเพิ่มบล็อกแก้วเข้าไปที่ร้อยละ 75 เหมาะสมที่สุด และเพิ่มแสงสว่างได้ไม่มากเกินไป เพราะว่าถ้าใส่เข้าไปมากกว่านี้จะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นแต่ภายในอาคารจะมีแสงสว่าง เพิ่มขึ้นและเพิ่มความเป็นฉนวนให้กับบล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบา ส่วนเหตุผลที่ไม่ใช้อัตราส่วนที่ ไม่เพิ่มบล็อกแก้วเข้าไปเพราะว่าต้องการเพิ่มแสงสว่างภายในห้อง



Pure	15%	10%	ฟอสฟอรัส
No. 00-44 Date : 10/05/25 11:20 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Fine Tm : 47.3 C(T1+T2)/2 T0 : 25.0 C dT : 24.0 C T2 : 49.0 C Result : 0.2590 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.2579 [W/mK]	No. 00-39 Date : 10/05/25 10:42 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Fine Tm : 41.6 C(T1+T2)/2 T0 : 25.2 C dT : 17.2 C T2 : 42.4 C Result : 0.6505 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.6503 [W/mK]	No. 00-36 Date : 10/05/25 10:08 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Quick Tm : 47.2 C(T1+T2)/2 T0 : 25.5 C dT : 23.5 C T2 : 49.1 C Result : 0.2165 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.2154 [W/mK]	No. 00-33 Date : 10/05/25 09:42 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Quick Tm : 38.0 C(T1+T2)/2 T0 : 25.4 C dT : 13.2 C T2 : 38.7 C Result : 0.6834 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.6837 [W/mK]
No. 00-45 Date : 10/05/25 11:32 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Fine Tm : 41.9 C(T1+T2)/2 T0 : 24.8 C dT : 18.8 C T2 : 43.6 C Result : 0.2639 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.2636 [W/mK]	No. 00-40 Date : 10/05/25 10:51 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Quick Tm : 37.2 C(T1+T2)/2 T0 : 25.3 C dT : 12.7 C T2 : 38.0 C Result : 0.6046 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.6050 [W/mK]	No. 00-37 Date : 10/05/25 10:18 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Fine Tm : 47.2 C(T1+T2)/2 T0 : 25.5 C dT : 23.5 C T2 : 49.2 C Result : 0.2153 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.2142 [W/mK]	No. 00-35 Date : 10/05/25 09:58 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Quick Tm : 38.0 C(T1+T2)/2 T0 : 24.5 C dT : 14.2 C T2 : 38.7 C Result : 0.6848 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.6851 [W/mK]
No. 00-46 Date : 10/05/25 11:40 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Quick Tm : 46.1 C(T1+T2)/2 T0 : 24.9 C dT : 22.8 C T2 : 47.7 C Result : 0.2714 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.2705 [W/mK]	No. 00-41 Date : 10/05/25 10:57 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Fine Tm : 38.3 C(T1+T2)/2 T0 : 25.2 C dT : 13.9 C T2 : 39.1 C Result : 0.6295 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.6297 [W/mK]	No. 00-38 Date : 10/05/25 10:34 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 2.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Fine Tm : 47.0 C(T1+T2)/2 T0 : 25.4 C dT : 23.5 C T2 : 49.0 C Result : 0.2145 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.2134 [W/mK]	No. 00-53 Date : 10/05/25 13:39 Lot No : 0001 Probe : PD-11 No. : 11 Heater : 1.000 A2 Repeat : 1/ 1 Stable : Fine Tm : 31.6 C(T1+T2)/2 T0 : 24.8 C dT : 7.2 C T2 : 31.9 C Result : 0.6813 [W/mK] <COMPENSATED DATA> Temp : 40.0 C Result : 0.6823 [W/mK]

รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ การถ่ายเทความร้อนของผนังอาคาร (Overall Thermal Transfer Value) ดังสมการที่ (4.1)

%บล็อก 100 %

%บล็อกแก้ว 0 %

$$OTTV = \frac{(A_w \times U_w \times T_{deg}) + (A_f \times U_f \times \Delta T) + (A_f \times SC \times SF)}{A_0} \quad (4.1)$$

$$OTTV = \frac{(A_w \quad U_w \quad T_{deg}) + (A_f \quad U_f \quad \Delta T) + (A_f \quad SC \quad SF)}{A_0}$$

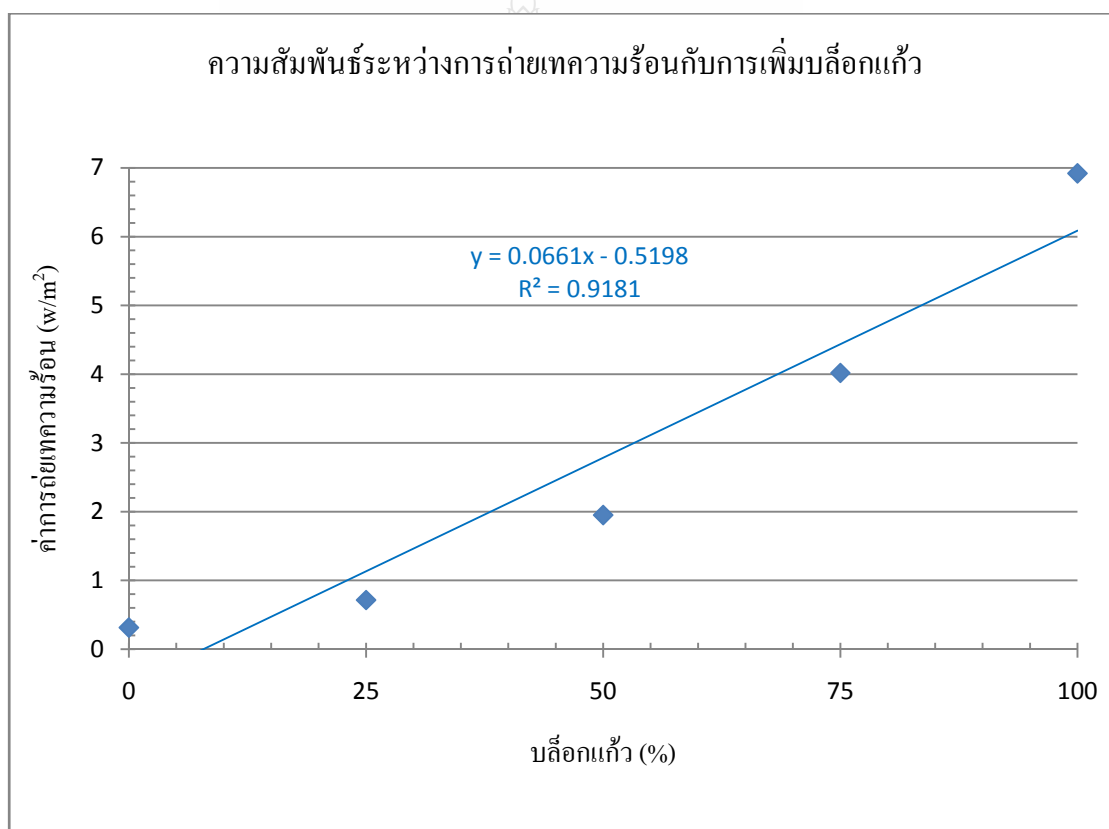
$$OTTV = \frac{(0.09 \quad 0.019 \quad 16.3) + (0 \quad 0 \quad 23.7) + (0 \quad 0.8 \quad 0.7)}{0.09}$$

$$OTTV = 0.314$$

A0=A _w +A _f	0.09
SC=SF/0.87	0.8046
SF=0.7	0.7
A _w พื้นที่ของผนังทึบ, ตร.ม	0.09
U _w ค่า ส.ป.ส.การถ่ายเทความร้อนของผนังทึบ, w/mk	0.2143
T _{Deg} ผลต่างของอุณหภูมิ, °c	16.3
A _f พื้นที่ของกระจก, ตร.ม	0
U _f ค่า ส.ป.ส.การถ่ายเทความร้อนของกระจก, w/mk	2.98
ΔT ผลต่างของอุณหภูมิภายในภายนอกอาคาร, °c	23.7
A _f พื้นที่ของกระจก, ตร.ม	0
SC ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด, w/mk	
SF ค่าตัวประกอบรังสีแสงอาทิตย์, °c	

ตารางที่ 4.7 ค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังอาคาร

ร้อยละของ บล็อกแก้ว	0	25	50	75	100
ค่าการถ่ายเทความร้อนของอาคารต่อพื้นที่ บล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบา	0.314	0.715	1.949	4.018	6.92
ค่าการถ่ายเทความร้อนของอาคารต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร (w/sq.m.)	3.489	7.944	21.656	44.644	76.889



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนกับการเพิ่มบล็อกแก้ว

จากกราฟมีค่าความเชื่อถือเท่ากับ 0.9181 และแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มบล็อกแก้วเข้าไปในอัตราส่วน ร้อยละ 75 มีค่าการถ่ายเทความร้อน 44.644 w/m² ซึ่งอยู่ในช่วงตามมาตรฐานพระราชบัญญัติการ ส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. ๒๕๓๕ คือมีค่าการถ่ายเทความร้อนได้ไม่เกิน 45 w/m²

4.1.5 ค่าส่องผ่านแสง

ตารางที่ 4.8 ค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังอาคารและการส่องผ่านแสง

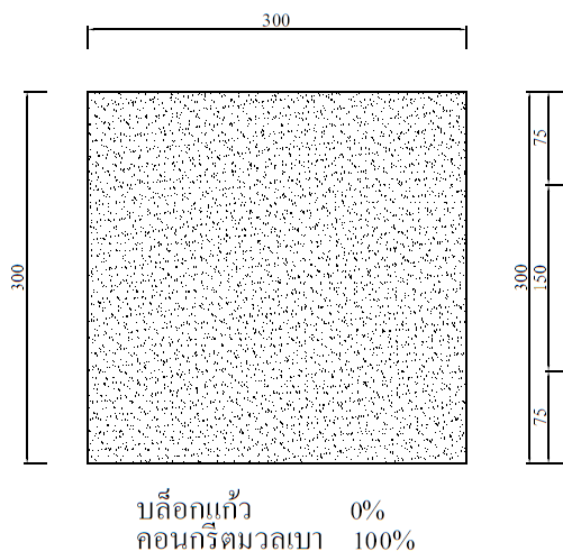
ร้อยละของ บล็อกแก้ว	0	25	50	75	100
ค่าการถ่ายเทความร้อนของอาคารต่อพื้นที่ บล็อกแก้วคอนกรีตมวลเบา	0.314	0.715	1.949	4.018	6.92
ค่าการถ่ายเทความร้อนของอาคารต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร (w/sq.m.)	3.489	7.944	21.656	44.644	76.889
การส่องผ่านแสงแบบ Transparent	0	18.75	37.5	56.25	75
การส่องผ่านแสงแบบ Non-Transparent	0	12.5-17.5	25-35	37.5-52.5	50-70
การส่องผ่านแสงแบบ Color	0	10	20	30	40

หมายเหตุ การส่องผ่านแสงแบบ Transparent ของบล็อกแก้วขนาด 19x19x80 มม. 75%

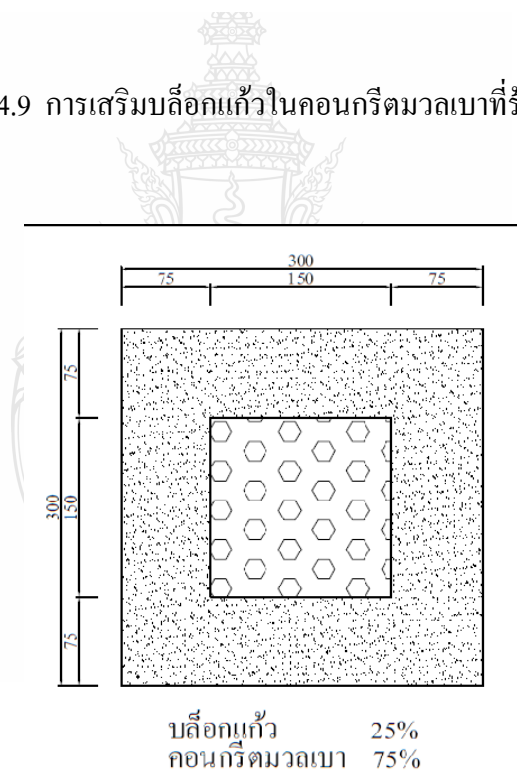
การส่องผ่านแสงแบบ Non-Transparent ของบล็อกแก้วขนาด 19x19x80 มม. 50-70%

การส่องผ่านแสงแบบ Color ของบล็อกแก้วขนาด 19x19x80 มม. 40%

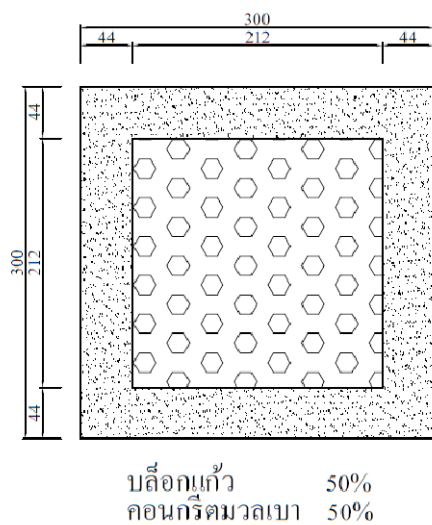
จากตารางเห็นได้ว่าการส่องผ่านแสงที่ร้อยละ 75 จะเหมาะสมที่สุดของทุกประเภท
ของบล็อกแก้วเนื่องจากจะมีความเป็นฉนวนของเนื้อคอนกรีตมวลเบารวมอยู่ด้วยตรงตามมาตรฐาน
แสงส่องผ่านของบล็อกแก้วและค่าการถ่ายเทความร้อนที่ร้อยละ 75 ก็เหมาะสมตามกฎหมายที่กำหนดไว้



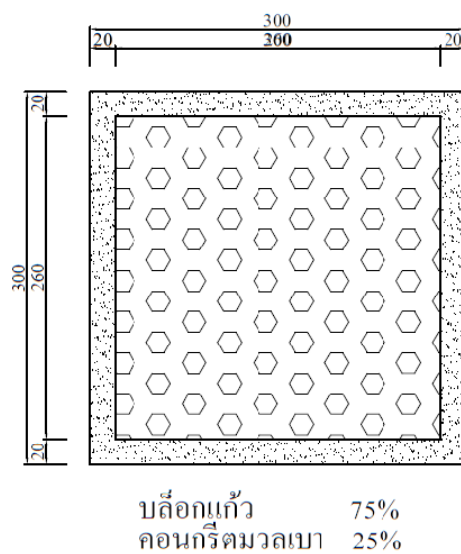
รูปที่ 4.9 การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 0



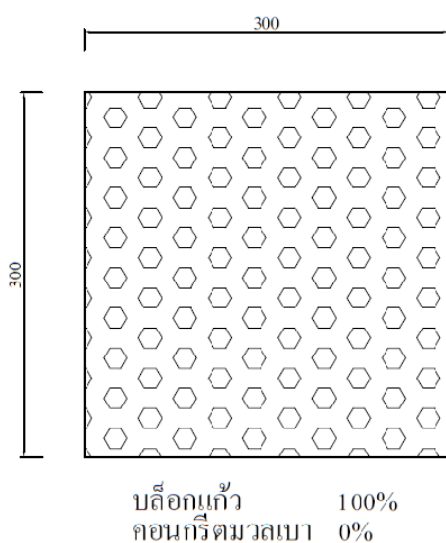
รูปที่ 4.10 การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 25



รูปที่ 4.11 การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 50



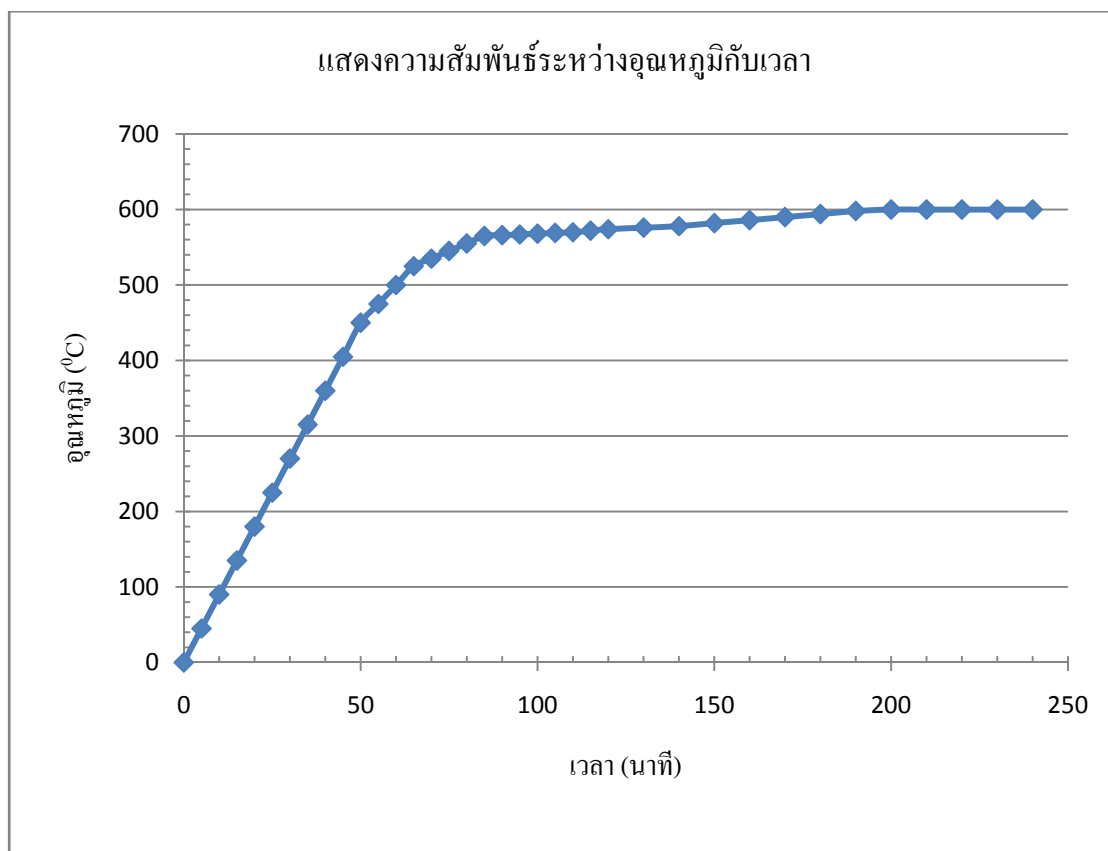
รูปที่ 4.12 การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 75



รูปที่ 4.13 การเสริมบล็อกแก้วในคอนกรีตมวลเบาที่ร้อยละ 100

4.1.5 ค่าความทนไฟ

หลังจากการนำตัวอย่างไปอบในเตาอบโดยอบที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปเผาในเตาเผาซึ่งเป็นการไล่ความชื้นในตู้ทดสอบเพื่อตรงกับการใช้งานจริงที่ว่า การเกิดเพลิงไหม้กับอาคารมักจะเกิดหลังจากอาคารได้ก่อสร้างมาเป็นเวลานานแล้ว หลังจากนั้นจึงค่อยทำการเผาในเตาเผาแบบควบคุมอุณหภูมิที่ตามอุณหภูมิที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้ คือ 600 องศาเซลเซียส รวมเวลาทั้งหมด 4 ชั่วโมง โดยระยะแรกของการให้ความร้อนจะปล่อยให้อุณหภูมิมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างอิสระ โดยไม่มีการควบคุมให้คงที่ แต่เมื่ออุณหภูมิถึง 600 องศาเซลเซียส จะทำการควบคุมอุณหภูมินี้ไว้ให้คงที่ ดังนั้นจึงแบ่งประเภทของบล็อกเป็น ประเภท F คือ สามารถคงสภาพการใช้งานได้เมื่อมีการทดสอบความร้อน โดยที่วัสดุป้องกันการลามไฟสามารถต้านทานการลามของเปลวไฟสู่ผิวตัวอย่างทดสอบด้านไม่สัมผัสไฟได้ภายในระยะเวลาการทดสอบ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

4.2 การวิเคราะห์

4.2.1. จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ต่อ พงอะลูมิเนียม พบว่าเมื่อเพิ่มพองอะลูมิเนียมตามอัตราส่วนผสม มีผลทำให้กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ลดต่ำลงตามอัตราส่วนผสม และจากการตั้งสมมติฐานพบว่าอาจมีสาเหตุมาจากพองอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ มีผลทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ลดลง

4.2.2. จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ต่อ แก้วกาออกุตสาหกรรม พบว่าเมื่อเพิ่มแก้วกาออกุตสาหกรรมตามอัตราส่วนผสม มีผลทำให้กำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ ลดต่ำลงตามอัตราส่วนผสม แต่ความหนาแน่นกลับมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มแก้วกาออกุตสาหกรรมเข้าไปและจากผลการทดลองพบว่าแก้วกาออกุตสาหกรรมมีการดูดซึมน้ำทำให้ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำหรือปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาของไฮเดรชันที่จะเกิดขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติต่าง ๆ ลดลง

4.2.3. จากผลการทดลองพบว่าอัตราการดูดซึมน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณเถาอากาศอุตสาหกรรมที่เพิ่มเข้าไป ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคของเถาอากาศอุตสาหกรรมเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่เกิดจากฟองอากาศส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง

4.2.4. เถาอากาศอุตสาหกรรมมีแหล่งที่มาหลายแห่งซึ่งอาจมีคุณสมบัติของเถาอากาศอุตสาหกรรมที่แตกต่างกันทำให้ส่งผลคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความถ่วงจำเพาะ ความชื้น ขนาดของอนุภาค ฯ จึงอาจทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของบล็อกมวลเบาแตกต่างกัน

4.2.5. จากการตั้งสมมติฐานว่าเถาอากาศอุตสาหกรรมเบาว่าปูนซีเมนต์ดังนั้นเมื่อนำเถาอากาศอุตสาหกรรมมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในบล็อกมวลเบา ความหนาแน่นจะมีค่าน้อยกว่าบล็อกมวลเบาที่ไม่ใส่เถาอากาศอุตสาหกรรมแต่จากการทดสอบแล้วพบว่าเถาอากาศอุตสาหกรรมมีความต้องการน้ำมากและเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์จะต้องเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างพอเพียงและจากอนุภาคของเถาอากาศอุตสาหกรรมที่มีความละเอียดสูงจะเข้าไปอุดช่องว่างของฟองอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาของผงอะลูมิเนียมทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น

4.2.6. จากผลการทดลองพบว่าส่วนผสมที่ดีที่สุดคือส่วนผสม LL 3 และเมื่อนำค่าไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 1505-2541 ชั้นคุณภาพที่ 2 พบว่าค่าความหนาแน่นยังมีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐาน ดังตารางที่ 4.5

4.2.7. จากเพิ่มบล็อกแก้วเข้าไปที่ร้อยละ 75 มีค่าการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 44.644 และเกินมาตรฐานพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. ๒๕๓๕ คือมีค่าการถ่ายเทความร้อนได้ไม่เกิน 45 w/m^2

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของส่วนผสม LL3 กับมาตรฐาน มอก. 1505-2541

คุณสมบัติ	หน่วย	Block Q-CON		LL3
		G2	G4	
1. ค่ารับกำลังอัด	กก./ตร.ซม.	≥ 30	≥ 50	45.87
2. ความหนาแน่นแห้ง	กก./ลบ.ม.	≤ 500	≤ 700	1238.40
3. ค่าการดูดซึมน้ำ	ร้อยละ	≤ 35	≤ 38	15.37
3. ค่าการถ่ายเทความร้อน	w/mk	0.18		0.2143



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีตมวลเบาผสมกากปูนขาวเพื่อหาส่วนผสมที่ดีที่สุดที่อายุ 28 วันพบว่า ส่วนผสมที่ดีที่สุดจะมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 51.21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังรับแรงคด 23.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่น 1,067.20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 24.65 เมื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 1505-2541 ชั้นคุณภาพที่ 4 พบว่า มีเพียงค่าความหนาแน่นเท่านั้นที่ไม่ผ่านตามมาตรฐานทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคของกากปูนขาวที่มีขนาดเล็กไปแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดทรายส่งผลให้ความหนาแน่นของบล็อกมวลเบาเพิ่มขึ้นและนอกจากนี้ยังส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลงตลอดจนความสามารถในการรับกำลังยังมากขึ้นอีกด้วยทั้งนี้จึงต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมและพัฒนาในส่วนของความหนาแน่นต่อไปเพื่อให้ผ่านตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 ชั้นคุณภาพที่ 4 จึงทำการเลือกใช้อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : ยิปซัม : เถ้าจากเตาเผาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ : พงอลูมิเนียม ที่ร้อยละ 29 : 50 : 9 : 10 : 2 โดยน้ำหนัก และเลือกเสริมบล็อกแก้วที่ร้อยละ 75 เนื่องจากค่าการถ่ายเทความร้อน = 44.64 วัตต์ต่อตารางเมตร อยู่ในกฎกระทรวง (พ.ศ. ๒๕๓๘) ออกตามความในพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. ๒๕๓๕ สำหรับอาคารใหม่ ไม่เกินกว่า 45 วัตต์ต่อตารางเมตรของผนังด้านนอก ค่าการส่องผ่านแสงที่ร้อยละ 75 จะเหมาะสมที่สุดของทุกประเภทของบล็อกแก้วเนื่องจากจะมีความเป็นฉนวนของเนื้อคอนกรีตมวลเบารวมอยู่ด้วยตรงตามมาตรฐานแสงส่องผ่านของบล็อกแก้ว

ในส่วนค่าความทนไฟจัดอยู่ในประเภท F คือ สามารถคงสภาพการใช้งานได้เมื่อมีการทดสอบความร้อน โดยที่วัสดุป้องกันการลามไฟสามารถต้านทานการลามของเปลวไฟสู่ผิวตัวอย่างทดสอบด้านไม่สัมผัสไฟได้ ภายใต้ระยะเวลาการทดสอบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. หากใส่ผงอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาของผงอลูมิเนียมกับปูนซีเมนต์มากขึ้น ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนขนาดเล็กแทรกตัวอยู่ทั่วไปในเนื้อมอร์ตาร์ ดังนั้นมอร์ตาร์จึงอาจเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงจนอยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 ชั้นคุณภาพที่ 2

2. หากใช้กากปูนขาวแทนที่ทรายและใส่มากกว่า 10% อาจส่งผลให้มอร์ตาร์ไม่แข็งตัวและเกิดการยุบของเนื้อมอร์ตาร์ทำให้ไม่สามารถใส่กากอุตสาหกรรมแทนที่ทรายและใส่มากกว่า 10% ได้ หากใส่ผงอลูมิเนียมมากกว่า 2% จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเนื่องจากผงอลูมิเนียมมีราคาสูง

3. การเลือกซื้อผงอลูมิเนียมควรเลือกที่มีคุณสมบัติ Mw 26.98, mp 660 °c, bp 2467 ° ทั้งนี้ควรเลือกที่เป็นผงละเอียด ไม่ใช่เกร็ดอลูมิเนียมเนื่องจากถ้าไม่ใช่จะทำให้คอนกรีตไม่เกิดปฏิกิริยาในขณะเท



บรรณานุกรม

- [1] บริษัทแอดวานซ์อะโกรจำกัด (มหาชน). 2551 . [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
<http://www.qcon.co.th/contrast.ptp/visitfactory.asp> (12 กันยายน 2551).
- [2] บริษัท บางกอกคริสตัล จำกัด [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก :
http://www.selectcon.com/material_detail/mat_3.asp?cid=104 (25 มกราคม 255).
- [3] กิตติพล เกียรติวรยศ , วันชัย โง้วประเสริฐ และเกรียงศักดิ์ ห่วงน้ำ. (2547). **การพัฒนาคุณภาพคอนกรีตมวลเบาจากกากอุตสาหกรรม**. ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [4] กัมพล บุญสิงห์ , โชคชัย พัฒนาศรี และบุษยง หาการ. (2548). **แท่งคอนกรีตน้ำหนักเบา** **ออกแบบประสงคใ้ใช้ป้แซมสังเคราะห์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นมวลรวมหลัก**. ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [5] กฤษฎา ไรจน์ประสิทธิ์พร , สุภัทรชัย สดกกล้า และอรวินท์ บริรักษ์อรวินท์. (2546). **คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมไมโครไฟเบอร์**. ปรินิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต , สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [6] กฤษณะ อภัยนอก , สุพิทักษ์ จรุงวิทย์ และสิทธิชัย สุบินดี. (2547). **แท่งคอนกรีตน้ำหนักเบาออกแบบประสงคใ้ใช้**. ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [7] คันธนา สุขะพล , ปรีชา แก้วสวรรค์ และภาระกิจ ละอองทอง. (2546). **“คอนกรีตมวลเบาผสมกระดาษ”** ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาก่อสร้างและงานไม้ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [8] จิรพจน์ คุระเอียด , มนตรี อโหสิ และวรวิทย์ พัฒนแก้ว. (2547). **“ถานคอนกรีตเสริมเหล็กไฟมซีเมนต์”** ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาก่อสร้างและงานไม้ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [9] จีระศักดิ์ ไพราม , ศุภชัย ศิลาประจวบ และสมพงษ์ ชื่นประไพ. (2546). **“กรณีศึกษาการทำผสมหยาบมวลเบาไฟมซีเมนต์”** ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาก่อสร้างและงานไม้ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] ชมาดุลย์ พุ่มแย้ม , รัฐศาสตร์ , คลังบุญครอง และอนันต์ ชีวตาวงศ์. (2548). “ **คอนกรีตเบาจากเศษคอนกรีตงานรื้อถอนผสมน้ำยากักกระจายฟองอากาศ** ” ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [11] ชยาทิพย์ วัฒนวิทย์กิจ. **วัสดุก่อสร้าง**. พิมพ์ครั้งที่ 5. ขอนแก่น : งานบริหารและธุรการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ; 2539.
- [12] ไชยยันต์ ชัยจักร , ธยา แย้มเกษสุคนธ์ และนราวิทย์ เสวตสมบุญ (2545). **คอนกรีตมวลเบาจากกากอุตสาหกรรมรีไซเคิลหลัก**. ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [13] นรพงศ์ ศรีสวัสดิ์ , พุทธิพล ฮวบศรีพันธุ์ และธัญญ์ มั่งคั่ง. (2547). “ **คอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมขี้เถ้าโพตเผา** ” ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [14] เบญจพล บุญเฉลิม , พิเชฐ , เดียรวัฒนศิริ และวีรวัฒน์ เทียมเพ็ง. (2548). **คอนกรีตมวลเบาโดยผสมสารเพิ่มฟองอากาศ**. ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [15] ปิยะพงษ์ โมรา , สุราสินี พชรพรเพิ่ม และอิทธิ ชสมณี. (2550). **การศึกษาความเป็นไปได้ การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าถ่านหินในการผลิตอิฐบล็อกและคอนกรีตมวลเบา**. ปรินิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] ปิติ พานิชายุนนท์, จักร ผลิต, สุวิทย์ เพชรห้วยลึก, ชวณชัย เทพนวล, นพรัตน์ นานคง
แนบ, อนุจิตร จันทศรี. (2551). **การพัฒนาคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากฟางข้าว**. ปรินญา
นิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [17] ปิยะพล นาคเบญจพร , ไตรรงค์ ไกรสุรพงษ์, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และทรงศักดิ์ วัฒนชัย เสรีกุล.
(2543). **Process Formacell Pulping การฟอกเยื่อด้วยเทคนิคฟอร์มาเซล**. ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [18] พิระ ณ ถลาง , ศึกษา โยธจักร และปฐมพงษ์ ฐิติวิวัฒนกุล. (2540). **ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป**.
ปรินญาณิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [19] วชิรพงษ์ นิลเลิศ, เกียรติกร ศรีอรุณพรหม และเกียรติกร ศิริรัตน์. (2547). **คอนกรีตบล็อก
จากกากอุตสาหกรรมชนิดไม่รับน้ำหนัก**. ปรินญาณิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ.
- [20] ดร.วัชรระ เพิ่มชาติ. **อิฐมวลเบา**.งานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [21] ศตวรรษ ทวงชน. (2547). **การศึกษาผลกระทบระยะยาวของการนำกากปูนขาวจาก
อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษมาใช้ในการปูนก่อและปูนฉาบ**. ปรินญาณิพนธ์
วิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภาคผนวก ก

องค์ประกอบทางเคมีของกากปฐขาวในรูปของแข็งและส่วนที่ละลายน้ำและการเปรียบเทียบ
องค์ประกอบทางเคมีของปฐขาวและกากปฐขาว

ตารางผนวกที่ ก1 องค์ประกอบทางเคมีของกากปูนขาวในรูปของแข็งและส่วนที่ละลายน้ำ [21]

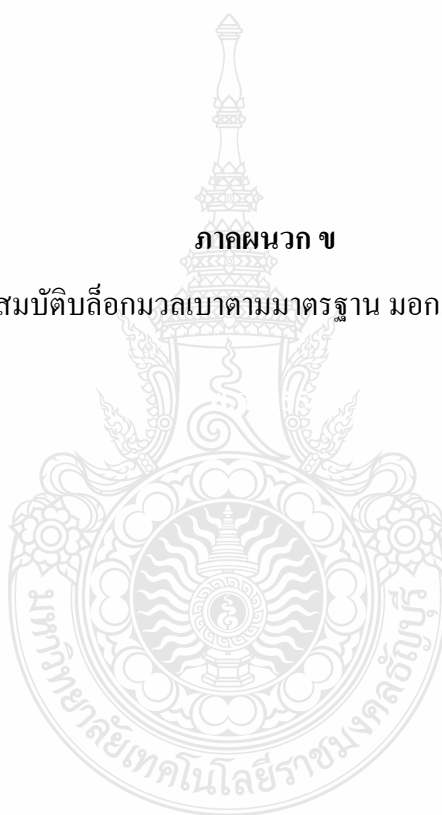
ธาตุ	ปริมาณของธาตุในกากปูนขาว	
	ส่วนของแข็ง (ppm)	ส่วนที่ละลายน้ำได้ (ppm)
K	3100	22
Na	12150	7675
Ca	337500	1825
Mg	9100	225
Al	775	50
Fe	850	3
Mn	35	5
Zn	4025	ไม่พบข้อมูล
Cu	8	3
P	881	30

ตารางที่ ก2 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวและกากปูนขาว [21]

ธาตุ	ปริมาณของธาตุชนิดต่างๆ	
	ปูนขาว (ppm)	กากปูนขาว (ppm)
K	3100	22
Mg	12150	7675
Ca	337500	1825
Fe	9100	225
Al	775	50
Na	850	3

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติที่ออกมวลงเบอตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541



ตารางที่ ข1 คุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541

คุณสมบัติ	หน่วย	Block Q-CON		Lintel & Panel
		G2	G4	
1. ความหนาแน่นแห้ง	กก./ลบ.ม.	500	700	≥ 600
2. ความหนาแน่นใช้งาน	กก./ลบ.ม.	620	910	≥ 780
3. ค่ารับกำลังอัด	กก./ตร.ซม.	≥ 30	≥ 50	≥ 40
4. Modulus Of Rupture	กก./ตร.ซม.	4.4	8	-
5. Ultimate Tensile Strength	กก./ตร.ซม.	4.4	4.4	-
6. Modulus Of Elasticity , E	กก./ตร.ซม.	15000	17500	21900
7. ค่าการดูดซึมน้ำ	ร้อยละ	≤ 35	≤ 38	-



ภาคผนวก ค
รูปวิธีการทำและขั้นตอนการทดสอบ





รูปผนวกที่ ค1 การชั่งตวงส่วนผสม



รูปผนวกที่ ค2 การผสมตัวอย่าง



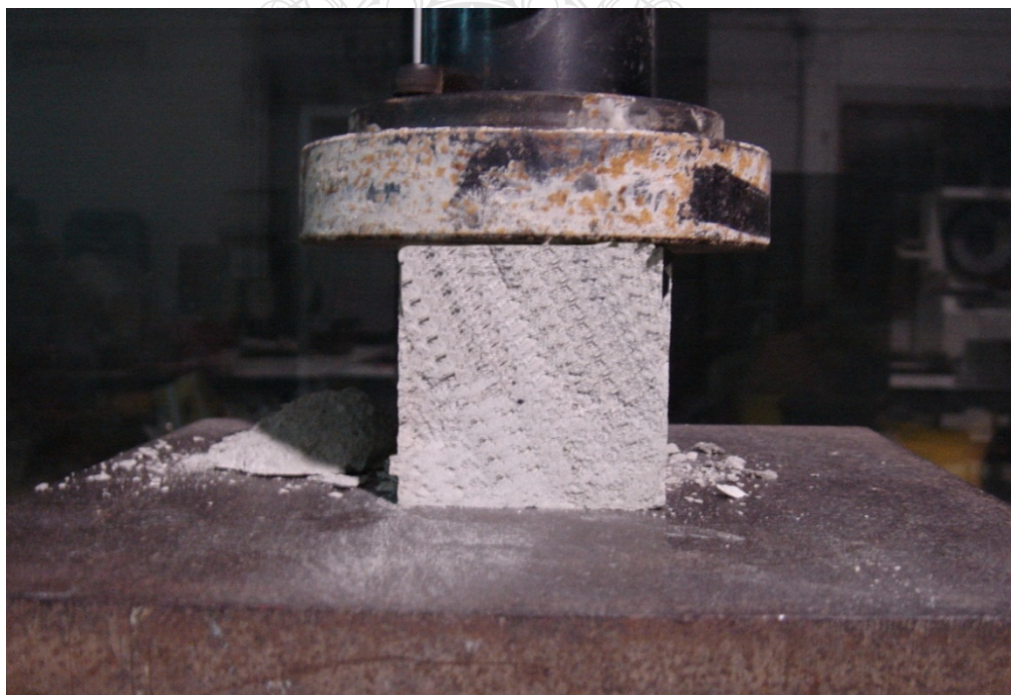
รูปผนวกที่ ค3 การเทมอร์ต้าวในแบบขนาด 5×5 เซนติเมตร



รูปผนวกที่ ค4 การเกิดปฏิกิริยาของมอร์ต้า



รูปผนวกที่ ค5 รูปมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ
ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร



รูปผนวกที่ ค6 การทดสอบกำลังรับแรงอัดขนาด 5x5x5 เซนติเมตร



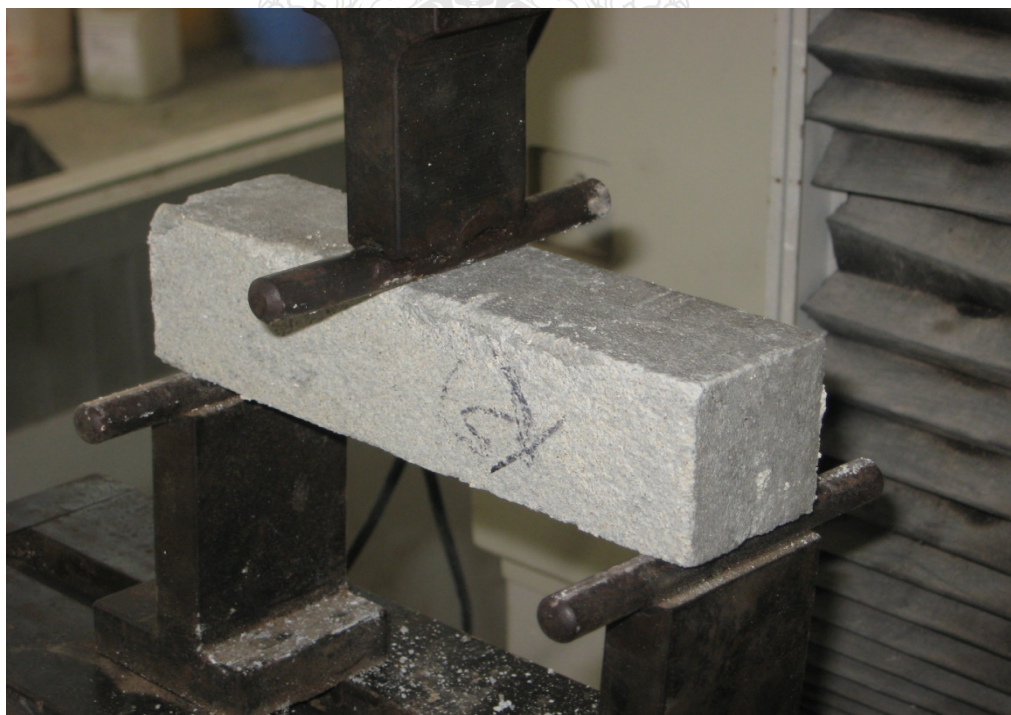
รูปผนวกที่ ค7 การเทมอร์ต้าร์ในแบบขนาด 4×4×16 เซนติเมตร



รูปผนวกที่ ค8 การเกิดปฏิกิริยาของมอร์ต้าร์



รูปผนวกที่ ค9 รูปมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงดัด 4x4x16 เซนติเมตร



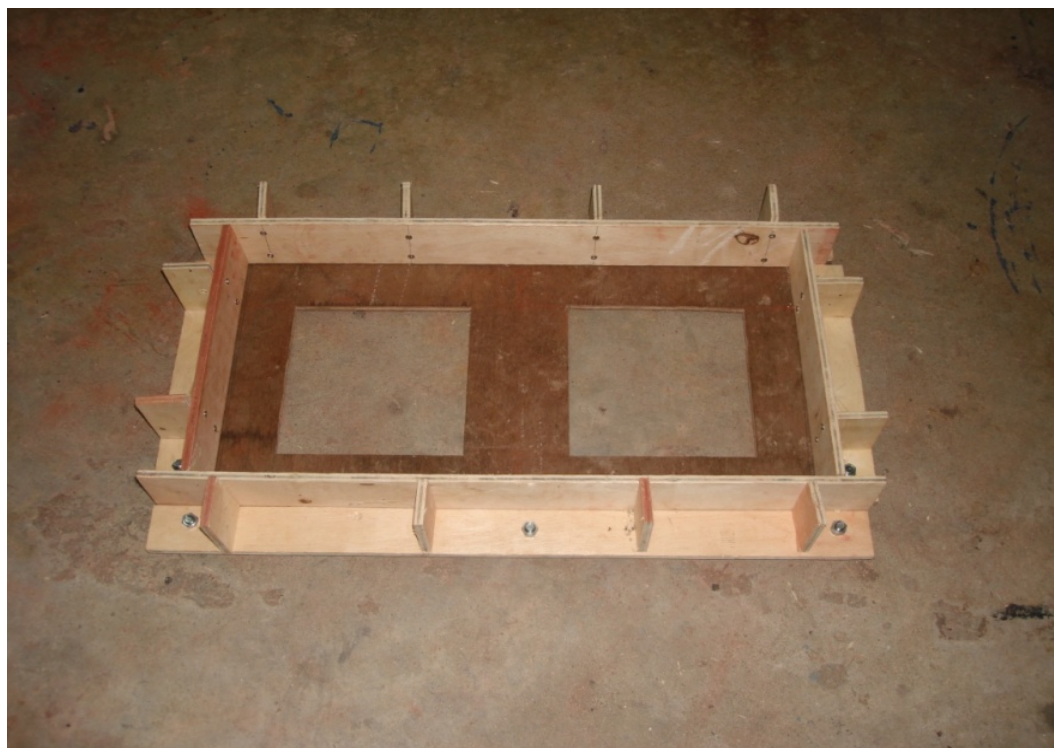
รูปผนวกที่ ค10 การทดสอบกำลังรับแรงดัดขนาด 4x4x16 เซนติเมตร



รูปผนวกที่ ค11 แบบตัวอย่างส่งทดสอบ



รูปผนวกที่ ค12 ทำแบบเพื่อเทงานจริง



รูปผนวกที่ ค13 แบบเตงานจริง



รูปผนวกที่ ค14 รูปตัวอย่างงานจริง



รูปผนวกที่ ค15 รูปตัวอย่างงานจริง



ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาผสมกากปูนขาว



ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	28.56	29.94
	2	31.58	
	3	29.69	
0.9 : 1 : 0.1	1	47.11	51.90
	2	55.78	
	3	52.80	
0.8 : 1 : 0.2	1	44.30	38.67
	2	34.62	
	3	37.08	
0.7 : 1 : 0.3	1	29.64	36.60
	2	40.85	
	3	39.30	
0.6 : 1 : 0.4	1	38.42	38.95
	2	39.52	
	3	38.93	
0.5 : 1 : 0.5	1	26.55	21.06
	2	16.57	
	3	20.05	
1.0 : 2 : 0	1	9.54	11.35
	2	12.44	
	3	12.06	
0.9 : 2 : 0.1	1	55.42	60.55
	2	65.02	
	3	61.22	

ตารางที่ ๖2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	19.75	18.84
	2	18.23	
	3	18.55	
0.9 : 1 : 0.1	1	17.95	15.14
	2	13.89	
	3	13.59	
0.8 : 1 : 0.2	1	18.38	20.03
	2	21.27	
	3	20.44	
0.7 : 1 : 0.3	1	29.22	33.50
	2	36.57	
	3	34.71	
0.6 : 1 : 0.4	1	17.23	18.16
	2	21.80	
	3	15.45	
0.5 : 1 : 0.5	1	24.57	24.63
	2	24.69	
	3	24.64	
1.0 : 2 : 0	1	70.25	64.17
	2	45.45	
	3	76.81	
0.9 : 2 : 0.1	1	64.45	60.13
	2	67.51	
	3	48.43	
0.8 : 2 : 0.2	1	46.86	41.45
	2	33.27	
	3	44.22	
0.7 : 2 : 0.3	1	33.36	34.59
	2	35.81	
	3	34.60	
0.6 : 2 : 0.4	1	35.52	23.01
	2	18.12	
	3	15.38	
0.5 : 2 : 0.5	1	22.47	21.56
	2	12.41	
	3	29.79	

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	12.72	14.53
	2	15.25	
	3	15.62	
0.9 : 1 : 0.1	1	23.40	20.16
	2	19.09	
	3	17.99	
0.8 : 1 : 0.2	1	22.03	21.52
	2	19.90	
	3	22.62	
0.7 : 1 : 0.3	1	16.68	20.35
	2	19.59	
	3	24.77	
0.6 : 1 : 0.4	1	14.34	15.24
	2	15.87	
	3	15.50	
0.5 : 1 : 0.5	1	15.05	16.23
	2	16.82	
	3	16.82	
1.0 : 2 : 0	1	3.60	4.00
	2	5.52	
	3	2.88	
0.9 : 2 : 0.1	1	14.82	17.21
	2	11.80	
	3	25.02	

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 7 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงดัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	14.59	14.26
	2	14.36	
	3	13.85	
0.9 : 1 : 0.1	1	17.76	16.97
	2	15.36	
	3	17.80	
0.8 : 1 : 0.2	1	12.96	12.62
	2	11.77	
	3	13.12	
0.7 : 1 : 0.3	1	11.19	11.12
	2	10.45	
	3	11.73	
0.6 : 1 : 0.4	1	12.10	11.21
	2	10.28	
	3	11.26	
0.5 : 1 : 0.5	1	15.19	15.21
	2	14.70	
	3	15.76	
1.0 : 2 : 0	1	21.64	23.30
	2	25.12	
	3	23.13	
0.9 : 2 : 0.1	1	26.16	22.54
	2	18.96	
	3	22.50	
0.8 : 2 : 0.2	1	27.25	18.95
	2	13.62	
	3	16.00	
0.7 : 2 : 0.3	1	13.28	13.61
	2	14.18	
	3	13.38	
0.6 : 2 : 0.4	1	17.01	17.24
	2	17.33	
	3	17.38	
0.5 : 2 : 0.5	1	14.41	14.21
	2	13.85	
	3	14.36	

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความหนาแน่นที่อายุ 7 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น kg/m ³	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	1008.80	1040.27
	2	1026.40	
	3	1085.60	
0.9 : 1 : 0.1	1	1240.80	1215.47
	2	1194.40	
	3	1211.20	
0.8 : 1 : 0.2	1	1083.20	1091.47
	2	1138.40	
	3	1052.80	
0.7 : 1 : 0.3	1	1192.00	1209.87
	2	1225.60	
	3	1212.00	
0.6 : 1 : 0.4	1	1328.80	1332.00
	2	1354.40	
	3	1312.80	
0.5 : 1 : 0.5	1	1028.80	1054.93
	2	1002.40	
	3	1133.60	
1.0 : 2 : 0	1	984.80	987.20
	2	985.60	
	3	991.20	
0.9 : 2 : 0.1	1	1349.60	1348.53
	2	1348.80	
	3	1347.20	

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบความหนาแน่นที่อายุ 7 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น kg/m ³	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	868.80	850.40
	2	836.00	
	3	846.40	
0.9 : 1 : 0.1	1	1000.00	1003.73
	2	1008.80	
	3	1002.40	
0.8 : 1 : 0.2	1	968.80	965.60
	2	967.20	
	3	960.80	
0.7 : 1 : 0.3	1	1028.80	1028.53
	2	1025.60	
	3	1031.20	
0.6 : 1 : 0.4	1	991.20	1009.60
	2	1027.20	
	3	1010.40	
0.5 : 1 : 0.5	1	1141.60	1134.67
	2	1122.40	
	3	1140.00	
1.0 : 2 : 0	1	1256.00	1239.47
	2	1235.20	
	3	1227.20	
0.9 : 2 : 0.1	1	1376.00	1402.13
	2	1430.40	
	3	1400.00	
0.8 : 2 : 0.2	1	1476.00	1411.20
	2	1283.20	
	3	1474.40	
0.7 : 2 : 0.3	1	1353.60	1314.67
	2	1286.40	
	3	1304.00	
0.6 : 2 : 0.4	1	1390.40	1408.27
	2	1418.40	
	3	1416.00	
0.5 : 2 : 0.5	1	1394.40	1361.60
	2	1330.40	
	3	1360.00	

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 7 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	26.09	22.34
	2	24.94	
	3	15.99	
0.9 : 1 : 0.1	1	26.50	28.30
	2	25.45	
	3	32.96	
0.8 : 1 : 0.2	1	28.06	27.08
	2	22.63	
	3	30.55	
0.7 : 1 : 0.3	1	25.17	23.46
	2	22.85	
	3	22.38	
0.6 : 1 : 0.4	1	29.14	29.06
	2	28.00	
	3	30.04	
0.5 : 1 : 0.5	1	34.21	32.58
	2	36.07	
	3	27.45	
1.0 : 2 : 0	1	34.93	34.38
	2	32.39	
	3	35.84	
0.9 : 2 : 0.1	1	18.61	18.81
	2	18.21	
	3	19.60	

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 7 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	31.40	34.37
	2	35.69	
	3	36.01	
0.9 : 1 : 0.1	1	26.56	26.65
	2	24.98	
	3	28.41	
0.8 : 1 : 0.2	1	28.49	30.03
	2	28.95	
	3	32.64	
0.7 : 1 : 0.3	1	28.15	27.79
	2	27.85	
	3	27.39	
0.6 : 1 : 0.4	1	35.19	31.11
	2	27.57	
	3	30.56	
0.5 : 1 : 0.5	1	31.11	31.74
	2	33.21	
	3	30.88	
1.0 : 2 : 0	1	20.51	19.70
	2	18.33	
	3	20.27	
0.9 : 2 : 0.1	1	25.29	19.92
	2	14.54	
	3	19.94	
0.8 : 2 : 0.2	1	4.23	16.68
	2	37.34	
	3	8.46	
0.7 : 2 : 0.3	1	20.45	21.20
	2	20.52	
	3	22.64	
0.6 : 2 : 0.4	1	19.97	17.04
	2	15.28	
	3	15.88	
0.5 : 2 : 0.5	1	18.47	17.87
	2	17.38	
	3	17.76	

ตารางที่ ๙ ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	36.80	36.48
	2	36.19	
	3	36.44	
0.9 : 1 : 0.1	1	25.30	23.59
	2	23.80	
	3	21.67	
0.8 : 1 : 0.2	1	46.43	41.36
	2	37.70	
	3	39.95	
0.7 : 1 : 0.3	1	21.94	29.67
	2	39.44	
	3	27.62	
0.6 : 1 : 0.4	1	39.00	27.37
	2	16.01	
	3	27.11	
0.5 : 1 : 0.5	1	7.69	7.75
	2	8.00	
	3	7.57	
1.0 : 2 : 0	1	13.42	12.65
	2	12.01	
	3	12.53	
0.9 : 2 : 0.1	1	50.49	55.78
	2	60.88	
	3	55.96	

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	13.25	15.45
	2	17.18	
	3	15.93	
0.9 : 1 : 0.1	1	16.22	20.99
	2	26.14	
	3	20.61	
0.8 : 1 : 0.2	1	24.90	22.68
	2	22.01	
	3	21.12	
0.7 : 1 : 0.3	1	20.24	27.29
	2	29.88	
	3	31.74	
0.6 : 1 : 0.4	1	12.91	19.72
	2	26.20	
	3	20.06	
0.5 : 1 : 0.5	1	20.38	16.00
	2	7.62	
	3	20.01	
1.0 : 2 : 0	1	62.40	54.49
	2	64.01	
	3	37.05	
0.9 : 2 : 0.1	1	69.98	57.23
	2	33.90	
	3	67.80	
0.8 : 2 : 0.2	1	56.93	44.83
	2	30.72	
	3	46.84	
0.7 : 2 : 0.3	1	38.25	30.91
	2	35.27	
	3	19.20	
0.6 : 2 : 0.4	1	49.05	38.94
	2	43.68	
	3	24.09	
0.5 : 2 : 0.5	1	17.95	22.66
	2	17.78	
	3	32.26	

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 14 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงดัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	11.66	12.30
	2	16.03	
	3	9.21	
0.9 : 1 : 0.1	1	12.27	14.17
	2	15.28	
	3	14.98	
0.8 : 1 : 0.2	1	25.18	24.32
	2	19.20	
	3	28.57	
0.7 : 1 : 0.3	1	10.44	14.26
	2	15.99	
	3	16.35	
0.6 : 1 : 0.4	1	16.97	18.42
	2	19.55	
	3	18.74	
0.5 : 1 : 0.5	1	21.26	18.96
	2	16.50	
	3	19.13	
1.0 : 2 : 0	1	7.80	5.43
	2	4.30	
	3	4.20	
0.9 : 2 : 0.1	1	14.01	18.33
	2	23.59	
	3	17.39	

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	16.89	16.84
	2	17.33	
	3	16.29	
0.9 : 1 : 0.1	1	17.96	16.63
	2	14.82	
	3	17.11	
0.8 : 1 : 0.2	1	13.26	15.43
	2	15.96	
	3	17.08	
0.7 : 1 : 0.3	1	14.39	13.70
	2	14.19	
	3	12.53	
0.6 : 1 : 0.4	1	11.96	11.83
	2	12.50	
	3	11.04	
0.5 : 1 : 0.5	1	16.17	15.19
	2	12.03	
	3	17.37	
1.0 : 2 : 0	1	30.07	28.56
	2	28.00	
	3	27.62	
0.9 : 2 : 0.1	1	34.59	31.44
	2	28.23	
	3	31.50	
0.8 : 2 : 0.2	1	18.18	19.00
	2	20.55	
	3	18.26	
0.7 : 2 : 0.3	1	16.31	16.95
	2	17.67	
	3	16.87	
0.6 : 2 : 0.4	1	19.91	19.38
	2	21.31	
	3	16.92	
0.5 : 2 : 0.5	1	20.84	19.30
	2	19.05	
	3	18.02	

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบความหนาแน่นที่อายุ 14 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น kg/m ³	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	952	956.8
	2	948	
	3	970.4	
0.9 : 1 : 0.1	1	1245.6	1253.33
	2	1290.4	
	3	1224	
0.8 : 1 : 0.2	1	1108.8	1110.13
	2	1098.4	
	3	1123.2	
0.7 : 1 : 0.3	1	1184	1197.07
	2	1202.4	
	3	1204.8	
0.6 : 1 : 0.4	1	1376.8	1293.6
	2	1374.4	
	3	1129.6	
0.5 : 1 : 0.5	1	1056.8	1057.07
	2	1054.4	
	3	1060	
1.0 : 2 : 0	1	1091.2	1095.2
	2	1100.8	
	3	1093.6	
0.9 : 2 : 0.1	1	1391.2	1382.93
	2	1378.4	
	3	1379.2	

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบความหนาแน่นที่อายุ 14 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	824.80	834.93
	2	834.40	
	3	845.60	
0.9 : 1 : 0.1	1	960.80	957.60
	2	946.40	
	3	965.60	
0.8 : 1 : 0.2	1	928.80	947.20
	2	927.20	
	3	985.60	
0.7 : 1 : 0.3	1	1009.60	994.93
	2	941.60	
	3	1033.60	
0.6 : 1 : 0.4	1	952.00	999.73
	2	1065.60	
	3	981.60	
0.5 : 1 : 0.5	1	1147.20	1132.00
	2	1114.40	
	3	1134.40	
1.0 : 2 : 0	1	1270.40	1271.73
	2	1272.80	
	3	1272.00	
0.9 : 2 : 0.1	1	1449.60	1457.87
	2	1464.00	
	3	1460.00	
0.8 : 2 : 0.2	1	1284.80	1357.07
	2	1418.40	
	3	1368.00	
0.7 : 2 : 0.3	1	1228.80	1271.73
	2	1292.80	
	3	1293.60	
0.6 : 2 : 0.4	1	1338.40	1352.53
	2	1371.20	
	3	1348.00	
0.5 : 2 : 0.5	1	1260.00	1278.93
	2	1296.00	
	3	1280.80	

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 14 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	29.08	28.44
	2	29.96	
	3	26.30	
0.9 : 1 : 0.1	1	24.21	22.73
	2	17.17	
	3	26.80	
0.8 : 1 : 0.2	1	28.21	27.36
	2	29.50	
	3	24.36	
0.7 : 1 : 0.3	1	28.38	26.98
	2	26.28	
	3	26.29	
0.6 : 1 : 0.4	1	23.36	32.58
	2	23.05	
	3	51.35	
0.5 : 1 : 0.5	1	29.22	29.97
	2	31.26	
	3	29.43	
1.0 : 2 : 0	1	33.72	32.75
	2	32.19	
	3	32.33	
0.9 : 2 : 0.1	1	21.56	21.85
	2	22.00	
	3	21.98	

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 14 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	33.56	31.86
	2	31.83	
	3	30.18	
0.9 : 1 : 0.1	1	29.64	30.17
	2	31.70	
	3	29.16	
0.8 : 1 : 0.2	1	31.52	31.70
	2	38.65	
	3	24.92	
0.7 : 1 : 0.3	1	29.71	28.52
	2	29.14	
	3	26.70	
0.6 : 1 : 0.4	1	28.82	29.92
	2	27.85	
	3	33.09	
0.5 : 1 : 0.5	1	24.27	27.96
	2	32.59	
	3	27.01	
1.0 : 2 : 0	1	17.95	17.45
	2	16.91	
	3	17.48	
0.9 : 2 : 0.1	1	17.22	17.30
	2	17.49	
	3	17.21	
0.8 : 2 : 0.2	1	28.58	17.17
	2	6.03	
	3	16.90	
0.7 : 2 : 0.3	1	18.23	16.51
	2	17.88	
	3	13.42	
0.6 : 2 : 0.4	1	22.30	22.05
	2	21.65	
	3	22.20	
0.5 : 2 : 0.5	1	24.25	19.99
	2	15.86	
	3	19.86	

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	40.28	37.22
	2	31.38	
	3	40.00	
0.9 : 1 : 0.1	1	79.05	71.93
	2	64.71	
	3	72.04	
0.8 : 1 : 0.2	1	50.56	51.21
	2	51.88	
	3	51.19	
0.7 : 1 : 0.3	1	37.00	36.32
	2	36.03	
	3	35.92	
0.6 : 1 : 0.4	1	51.42	37.34
	2	20.61	
	3	40.00	
0.5 : 1 : 0.5	1	33.62	32.07
	2	30.55	
	3	32.04	
1.0 : 2 : 0	1	18.24	15.51
	2	12.24	
	3	16.04	
0.9 : 2 : 0.1	1	61.77	58.01
	2	52.26	
	3	60.00	

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	26.12	25.66
	2	24.84	
	3	26.00	
0.9 : 1 : 0.1	1	26.08	24.05
	2	21.54	
	3	24.53	
0.8 : 1 : 0.2	1	32.32	29.89
	2	27.76	
	3	29.58	
0.7 : 1 : 0.3	1	22.94	30.93
	2	33.74	
	3	36.11	
0.6 : 1 : 0.4	1	25.16	24.01
	2	24.62	
	3	22.27	
0.5 : 1 : 0.5	1	30.41	28.51
	2	26.70	
	3	28.41	
1.0 : 2 : 0	1	37.86	75.33
	2	90.75	
	3	97.37	
0.9 : 2 : 0.1	1	78.01	81.35
	2	81.23	
	3	84.81	
0.8 : 2 : 0.2	1	73.33	66.90
	2	54.93	
	3	72.44	
0.7 : 2 : 0.3	1	55.34	54.92
	2	47.92	
	3	61.50	
0.6 : 2 : 0.4	1	27.69	41.48
	2	48.08	
	3	48.66	
0.5 : 2 : 0.5	1	34.04	34.16
	2	36.17	
	3	32.26	

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงดัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	23.04	24.27
	2	26.84	
	3	22.95	
0.9 : 1 : 0.1	1	24.88	26.29
	2	25.92	
	3	28.07	
0.8 : 1 : 0.2	1	14.08	23.18
	2	31.50	
	3	23.96	
0.7 : 1 : 0.3	1	16.57	23.28
	2	26.17	
	3	27.09	
0.6 : 1 : 0.4	1	14.98	17.54
	2	19.59	
	3	18.05	
0.5 : 1 : 0.5	1	21.65	22.41
	2	23.16	
	3	22.43	
1.0 : 2 : 0	1	6.00	6.25
	2	7.13	
	3	5.63	
0.9 : 2 : 0.1	1	36.29	25.38
	2	19.32	
	3	20.54	

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด ksc	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	17.06	17.47
	2	16.98	
	3	18.37	
0.9 : 1 : 0.1	1	18.16	19.30
	2	20.11	
	3	19.62	
0.8 : 1 : 0.2	1	19.82	18.18
	2	17.00	
	3	17.73	
0.7 : 1 : 0.3	1	16.92	16.39
	2	16.04	
	3	16.21	
0.6 : 1 : 0.4	1	14.16	14.98
	2	16.08	
	3	14.71	
0.5 : 1 : 0.5	1	16.52	16.96
	2	19.22	
	3	15.15	
1.0 : 2 : 0	1	34.40	35.50
	2	35.77	
	3	36.34	
0.9 : 2 : 0.1	1	34.38	32.19
	2	28.43	
	3	33.76	
0.8 : 2 : 0.2	1	20.01	19.01
	2	17.25	
	3	19.76	
0.7 : 2 : 0.3	1	19.25	19.42
	2	19.43	
	3	19.59	
0.6 : 2 : 0.4	1	25.23	24.07
	2	22.94	
	3	24.05	
0.5 : 2 : 0.5	1	25.05	23.51
	2	25.87	
	3	19.62	

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กรากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น kg/m ³	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	942.40	942.40
	2	940.80	
	3	944.00	
0.9 : 1 : 0.1	1	1207.20	1204.27
	2	1204.80	
	3	1200.80	
0.8 : 1 : 0.2	1	1071.20	1067.20
	2	1066.40	
	3	1064.00	
0.7 : 1 : 0.3	1	1193.60	1190.40
	2	1184.80	
	3	1192.80	
0.6 : 1 : 0.4	1	1284.80	1287.73
	2	1289.60	
	3	1288.80	
0.5 : 1 : 0.5	1	1104.00	1106.40
	2	1103.20	
	3	1112.00	
1.0 : 2 : 0	1	953.60	956.27
	2	970.40	
	3	944.80	
0.9 : 2 : 0.1	1	1304.00	1318.40
	2	1322.40	
	3	1328.80	

ตารางที่ 22 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น kg/m ³	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	809.60	821.60
	2	832.80	
	3	822.40	
0.9 : 1 : 0.1	1	912.80	914.40
	2	908.00	
	3	922.40	
0.8 : 1 : 0.2	1	936.80	971.73
	2	996.00	
	3	982.40	
0.7 : 1 : 0.3	1	929.60	952.27
	2	1004.80	
	3	922.40	
0.6 : 1 : 0.4	1	953.60	996.80
	2	1022.40	
	3	1014.40	
0.5 : 1 : 0.5	1	1142.40	1162.93
	2	1154.40	
	3	1192.00	
1.0 : 2 : 0	1	1300.00	1343.73
	2	1288.80	
	3	1442.40	
0.9 : 2 : 0.1	1	1444.00	1459.47
	2	1484.00	
	3	1450.40	
0.8 : 2 : 0.2	1	1413.60	1390.43
	2	1402.40	
	3	1355.28	
0.7 : 2 : 0.3	1	1255.20	1286.93
	2	1305.60	
	3	1300.00	
0.6 : 2 : 0.4	1	1328.00	1334.93
	2	1345.60	
	3	1331.20	
0.5 : 2 : 0.5	1	1365.60	1368.00
	2	1377.60	
	3	1360.80	

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน W/C เท่ากับ 0.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	27.42	27.48
	2	27.47	
	3	27.54	
0.9 : 1 : 0.1	1	24.65	24.65
	2	24.77	
	3	24.52	
0.8 : 1 : 0.2	1	24.94	23.43
	2	24.08	
	3	21.28	
0.7 : 1 : 0.3	1	26.68	23.51
	2	18.23	
	3	25.62	
0.6 : 1 : 0.4	1	28.46	29.05
	2	29.71	
	3	28.99	
0.5 : 1 : 0.5	1	27.90	28.42
	2	30.60	
	3	26.76	
1.0 : 2 : 0	1	41.95	42.21
	2	46.58	
	3	38.10	
0.9 : 2 : 0.1	1	22.39	15.49
	2	8.95	
	3	15.11	

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน W/C เท่ากับ 0.6

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากปูนขาว	ตัวอย่างที่	ค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ	ค่าเฉลี่ย
1.0 : 1 : 0	1	29.55	30.83
	2	30.84	
	3	32.10	
0.9 : 1 : 0.1	1	31.20	31.53
	2	32.16	
	3	31.22	
0.8 : 1 : 0.2	1	29.72	27.58
	2	28.92	
	3	24.10	
0.7 : 1 : 0.3	1	28.74	29.58
	2	19.67	
	3	40.33	
0.6 : 1 : 0.4	1	35.07	27.80
	2	19.64	
	3	28.71	
0.5 : 1 : 0.5	1	27.45	27.11
	2	29.52	
	3	24.36	
1.0 : 2 : 0	1	15.20	12.26
	2	17.69	
	3	3.88	
0.9 : 2 : 0.1	1	17.45	14.37
	2	9.65	
	3	16.00	
0.8 : 2 : 0.2	1	13.47	15.96
	2	13.35	
	3	21.07	
0.7 : 2 : 0.3	1	14.09	12.49
	2	10.97	
	3	12.43	
0.6 : 2 : 0.4	1	17.29	16.18
	2	14.80	
	3	16.47	
0.5 : 2 : 0.5	1	18.98	17.76
	2	16.90	
	3	17.40	