ผลของสารก่อฟองที่มีผลต่อความต้านทานแรงอัด ของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว

EFFECT OF FOAMING AGENT ON COMPRESSIVE STRENGTH OF LIGHT WEIGTH BRICK FROM RAGEMENT GLASS

นางสาวปวีณา เกตุวงศ์ รหัส 49361126

นายธนาวุฒิ เอี่ยมอินทร์ รหัส 49364639

นายภิญโญ นวนทอง รหัส 49364721

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 16945793
เลขเรียกหนังสือ ม.ร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ฝ196 ผ 2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน ผลของสารก่อฟองที่มีผลต่อความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว

ผู้ดำเนินโครงงาน

นางสาวปวีณา	เกตุวงศ์	รหัส	49361126
นายธนาวุฒิ	เอี่ยมอินทร์	รหัส	49364639
นายภิญโญ	นวนทอง	รหัส	49364721

ที่ปรึกษาโครงงาน อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2552

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์นพวรรณ โม้ทอง)

.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ชุลีพรย์ ป่าไร่)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	ผลของสารก่อฟองที่มีผลต่อความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นางสาวปวีณา	เกตุวงศ์	รหัส 49361126
	นายธนาวุฒิ	เอี่ยมอินทร์	รหัส 49364639
	นายภิญโญ	นวนทอง	รหัส 49364721
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์ปิยนันท์	บุญพยัคฆ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2552		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการทำอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว เพื่อใช้สำหรับงานก่อสร้างอาคารบ้านเรือน โดยนำขวดแก้วสีชามาบดให้ละเอียด ผสมสารก่อฟอง (Foaming agent) ชนิดแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate : $CaCO_3$) ที่ได้มาจากการสังเคราะห์ และจากเปลือกหอยแครง เพราะปัจจุบันสารเคมีนั้นมีราคาแพง ดังนั้นโครงงานนี้จึงหาวัสดุธรรมชาติที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ ที่ทำให้เป็นสารเคมี 100 เปอร์เซ็นต์ มาทดแทนเพื่อลดค่าใช้จ่าย โดยทำการทดลองใช้สารก่อฟองแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นสารเคมี 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อเปรียบเทียบกับเปลือกหอยแครงซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ และมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบทางเคมี โดยใช้อัตราส่วนสารก่อฟองระหว่าง 0.5-2.0 กรัม/ผงแก้วบดละเอียด 100 กรัม และใช้โซเดียมซิลิเกต (Sodium siligate : $NaSiO_3$) เป็นสารเชื่อมประสาน ขึ้นรูปเป็นก้อนอิฐ เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างไปทดสอบ ตรวจสอบดูโครงสร้างพื้นผิว ทดสอบหาค่าความหนาแน่น ค่าความพรุนตัว และค่าความต้านทานแรงอัด พบว่าเมื่อเติมปริมาณสารก่อฟองเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง เมื่อความหนาแน่นลดลงจะสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวสูงขึ้น และเมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านแรงอัดลดลง โดยใช้สารก่อฟองแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นเปลือกหอยแครง ในอัตราส่วนเปลือกหอยแครงต่อผงแก้วสีชา เท่ากับ 2 : 100 จึงจะให้ค่าความต้านทานแรงอัดได้ตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.1505-2541) ชั้นคุณภาพ 4 เหมาะสำหรับโครงสร้างอาคารระบบไร้เสา-ไร้คาน

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เพราะได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ และแก้ไขข้อบกพร่องของการวิจัยด้วยดีตลอดมา ทำให้ปริญญานิพนธ์มีความสมบูรณ์และถูกต้อง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์นพวรรณ โม้ทอง และอาจารย์ชุลีพรย์ ป่าไร่ ที่กรุณาสละเวลา พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้โครงงานนี้

ครูช่างประเทือง โมรารายา ครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร และครูช่างรณกฤต แสงผ่อง ที่คอยแนะนำการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ อย่างถูกต้องอีกด้วย

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนให้คณะผู้จัดทำเป็นคนดีของสังคม

ขอขอบพระคุณเพื่อนทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำโครงงานนี้สำเร็จลุลวงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ให้กำเนิด และทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากโครงงานนี้ ทางผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ดำเนินโครงงาน
ปวีณา เกตุวงศ์
ธนาวุฒิ เอี่ยมอินทร์
ภิญโญ นวนทอง

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ซ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 หลักการ และเหตุผล 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output) 2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome) 2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย 3
1.6 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย 3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงานวิจัย (Gantt Chart) 3

บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎี 4
2.1 อิฐ 4
2.2 อิฐมวลเบา 5
2.2.1 ประเภทของอิฐมวลเบา 7
2.2.2 สมบัติที่โดดเด่นของอิฐมวลเบา 7
2.3 วัตถุดิบที่ศึกษา 9
2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว 9
2.3.2 ชนิดของแก้ว 10
2.4 สารก่อฟอง (Gasifier or foaming agent) 12
2.5 สารเชื่อมผสานชนิดโซเดียมซิลิเกต ($NaSiO_3$) 15
2.6 เครื่องบด 15
2.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8 การทดสอบ 19
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 24
3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 24
3.2 วัตถุดิบ และอุปกรณ์ 24
3.3 การเตรียมผงแก้ว 24
3.4 การเตรียมผงเปลือกหอยแครง 25
3.5 การเตรียมสารละลาย $NaSiO_3$ 25
3.6 การเตรียมตัวอย่าง 25
3.7 การวิเคราะห์วัฏภาค (Phases) ในเปลือกหอยแครง 28
3.8 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง 28
3.9 การทดสอบความหนาแน่น 28
3.10 การทดสอบความพรุนตัว 29
3.11 การทดสอบความต้านทานแรงอัด 29
3.12 วิจารณ์ผลการทดลอง และสรุปผลที่ได้ 29

บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ 30
4.1 การวิเคราะห์วัฏภาคของผง $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และผงเปลือกหอยแครง 30
4.2 ผลการศึกษา และเปรียบเทียบของสารก่อฟอง 2 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง 31
4.2.1 ผลการตรวจสอบดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว 31
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ผสมสารก่อฟอง 2 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง 33
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความพรุนตัวของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ผสมสารก่อฟอง 2 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง 35
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่ผสมสารก่อฟอง 2 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง 36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 บทสรุป 38
5.1 สรุปผลการทดลอง 38
5.2 ข้อเสนอแนะ 38
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา 39

เอกสารอ้างอิง 40

ภาคผนวก ก 42

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน 46

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ 3
2.1 ข้อดี และข้อเสียของอิฐมอญ 5
2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐมวลเบา 6
2.3 ข้อดี และข้อเสียของอิฐมวลเบา 8
2.4 องค์ประกอบเคมีของแก้วสีชา 11
2.5 สมบัติทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) 13
2.6 ชั้นคุณภาพคอนกรีตมวลเบา 18
3.1 อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบแก้ว และสารก่อฟอง 26
4.1 ลักษณะพื้นผิวของอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่ใช้สารก่อฟองชนิด $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัมเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 32
ก.1 ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว วัฏภาคที่ใช้เปลือกหอยแครง เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม 43
ก.2 ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม 43
ก.3 ค่าความพรุนตัวของอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่ใช้เปลือกหอยแครง เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม 44
ก.4 ค่าความพรุนตัวของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม 44
ก.5 ค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้เปลือกหอยแครง เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม 45
ก.6 ค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม 45

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ตัวอย่างอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว 2
2.1 ขนาดของอิฐมวลเบา 6
2.2 ค่าความหนืด-อุณหภูมิของแก้วสีชา 12
3.1 กระบวนการทำอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว 27
4.1 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคของผง $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ 30
4.2 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคของผงเปลือกหอยแครง 31
4.3 ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้สารก่อฟองชนิด $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม ต่อแก้ว 100 กรัม 34
4.4 ค่าความพรุนตัวของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้สารก่อฟองชนิด $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม ต่อแก้ว 100 กรัม 35
4.5 ค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่ใช้สารก่อฟองชนิด $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม ต่อแก้ว 100 กรัม 37

บทที่ 1
บทนำ

1.1 หลักการ และเหตุผล

อิฐ (Brick) เป็นวัสดุที่นำมาใช้ด้านงานก่อสร้างเป็นเวลานานมาแล้ว เมื่อสมัยโบราณประมาณ 2,000 ปีมาแล้ว อิฐในสมัยโบราณจะทำมาจากดินเหนียว โดยการขึ้นรูปเป็นก้อนอิฐด้วยมือ ซึ่งพบว่าอิฐที่ได้จะมีขนาดไม่เท่ากัน ลักษณะที่ใช้แตกต่างจากคอนกรีต ในเรื่องของความแข็งแรง คืออิฐที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงมาก เพราะใช้งานก่อกำแพง หรืองานเพื่อความสวยงาม และการทำอิฐสำหรับก่อสร้างของไทยได้ทำกันมานานแล้ว โดยส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมครอบครัว

ในแถบชนบทซึ่งมีขนาดเล็ก และอิฐที่ผลิตส่วนใหญ่เป็นอิฐมอญ ต่อมาได้มีการตั้งโรงงานใช้เครื่องจักรเข้ามาช่วยมากขึ้น โดยอิฐที่ทำการผลิตมีคุณภาพ และประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่อิฐบล็อก อิฐมวลเบา และอิฐโฟม

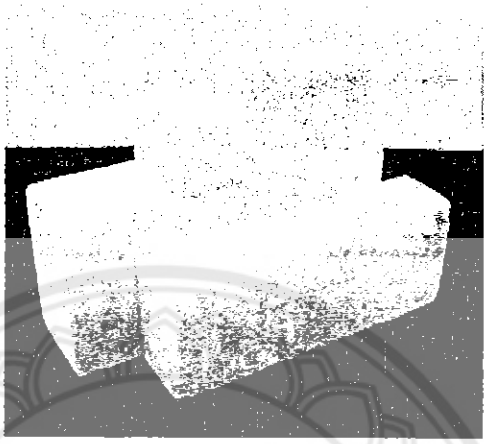
อิฐมวลเบา เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการก่อสร้างอาคาร บ้านเรือนในปัจจุบัน เนื่องจากมีสมบัติพิเศษ คือตัววัสดุมีน้ำหนักเบา ขนาดก้อนได้มาตรฐานเท่ากันทุกก้อน ทนไฟ ป้องกันความร้อน ป้องกันเสียง ตัดแต่งเข้ารูปง่าย ใช้งานได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีเศษเป็นอิฐหัก และที่สำคัญ คือ รวดเร็ว สะอาด ลดระยะเวลาในการก่อสร้าง ลดต้นทุนโครงสร้าง และยังนิยมใช้ในงานก่อสร้างตึกสูงประเภทอื่นๆ เช่นอาคารสำนักงาน โรงแรม และโรงพยาบาล เป็นต้น ปัจจุบันอิฐมวลเบาเป็นที่รู้จักกันในวงการก่อสร้าง และยอมรับในด้านสมบัติที่โดดเด่น จึงเปลี่ยนมาใช้อิฐมวลเบาทดแทนอิฐมอญ หรืออิฐบล็อกมากขึ้น

ปัจจุบันโลกมีวิวัฒนาการสูงขึ้น ประชากรก็เพิ่มขึ้น ปัญหาด้านมลภาวะ และขยะต่างๆ ก็เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดมาจากการกระทำของมนุษย์ จึงส่งผลให้สภาวะแวดล้อมที่มีอยู่เสียไป ปัญหาต่างๆ มาจากภาชนะบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่นกระดาษ พลาสติก โฟม อลูมิเนียม และแก้ว ซึ่งได้ผลิตมาในรูปแบบที่แตกต่างกัน เพื่อบรรจุอาหาร เครื่องดื่ม และความสะดวกในการบริโภค เมื่อเสร็จสิ้นจากการบริโภคจึงเกิดเป็นขยะจำนวนมาก ซึ่งเป็นปัญหาให้สังคมในปัจจุบัน (พงษ์เจษฎา, 2540)

การรีไซเคิล หรือการใช้ผลิตภัณฑ์แก้วที่ใช้แล้ว นำกลับมาการผลิตใหม่จึงเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ อีกทั้งยังลดการขาดดุลจากการสั่งซื้อสารเคมีจากต่างประเทศด้วย

ในประเทศไทยยังไม่มีการนำเศษแก้วไปใช้ประโยชน์ต่างๆ นอกจากการนำกลับไปหลอมใหม่ แต่ในต่างประเทศมีการนำเศษแก้วกลับมาใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ มากมาย อาทิเช่นใช้เป็นตัวกรอง (Fifltration medium), ใช้ผสมในคอนกรีต (Concrent mixture), ใช้เป็นวัสดุขัดสี (Abrasive), ใช้เป็นตัวช่วยของการลดอุณหภูมิในเซรามิกส์ (Fluxing agent), ใช้เป็นตัวเติมในสี (Fifter) และใช้ทำโฟมกลาส (Foam glass) เป็นต้น (วรรณา, 2551)

ดังนั้น โครงงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของสารก่อฟองชนิดแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate : $CaCO_3$) ที่ได้มาจากต่างแหล่ง คือแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้มาจากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง มาใช้ในการผลิตอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว เพื่อจะเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการก่อสร้าง และเป็นการนำขยะกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ (วรรณา, 2551)



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว
ที่มา : วรรณา (2551)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของสารก่อฟองที่ใช้ในการผลิตอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่มีผลต่อลักษณะพื้นผิว (Surface area), ความหนาแน่น (Density), ความพรุนตัว (Porosity) และความต้านทานของแรงอัด (Compressive strength) ของอิฐมวลเบาที่ผลิตได้

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของสารก่อฟองแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate : $CaCO_3$) ที่ใช้ในการผลิตอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ได้มาจากต่างแหล่งโดยเปรียบเทียบแคลเซียม-คาร์บอเนตที่ได้มาจากการสังเคราะห์ และจากธรรมชาติ คือเปลือกหอยแครง

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

อิฐมวลเบาจากเศษแก้ว

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

ได้ปริมาณสารก่อฟองที่ให้ค่าสมบัติต่างๆ ของอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่ได้ตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.1505-2541) ชั้นคุณภาพ 4 เหมาะสำหรับโครงสร้างอาคารระบบไร้เสา-ไร้คาน (มาตรฐานอุตสาหกรรม, 2541)

1.5 ขอบเขตในการดำเนินการวิจัย

1.5.1 เตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐมวลเบา ได้แก่ผงแก้วสีชา สารก่อฟองแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้มาจากการสังเคราะห์ และจากเปลือกหอยแครง โดยใช้สารเชื่อมประสานโซเดียมซิลิเกต (Sodium siligate : $NaSiO_3$)

1.5.2 ศึกษา และเปรียบเทียบผลของสารก่อฟองชนิดแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้มาจากต่างแหล่ง คือแคลเซียมคาร์บอเนตจากการสังเคราะห์ และจากเปลือกหอยแครง ที่ปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม โดยใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารเชื่อประสาน เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อลักษณะพื้นผิว (Surface area), ความหนาแน่น (Density), ความพรุนตัว (Porosity) และค่าความต้านทานของแรงอัด (Compressive strength) ของอิฐมวลเบาที่ผลิตได้

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

อาคารปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

มิถุนายน 2552 – เมษายน 2554

1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการวิจัย (Gantt Chart)

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ

ลำดับ	การดำเนินงาน	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	ศึกษา และรวบรวมข้อมูล	←	—	—				
2	ศึกษา และวางแผนขั้นตอนการผลิต		←	—	→			
3	ดำเนินงาน และทดสอบวัสดุหรือชิ้นงาน			←	—	—	→	
4	รวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ผล					←	—	→
5	เขียนรูปเล่มโครงงาน						←	— →

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎี

2.1 อิฐ

อิฐ นับเป็นหนึ่งในสิ่งประดิษฐ์ของมนุษย์ ที่สามารถนำมาบอกเล่าเรื่องราวในอดีตได้เป็นอย่างดี เป็นเวลากว่า 2,000 ปีมาแล้ว ที่มนุษย์รู้จักการนำดินโคลนจากแม่น้ำมาทำเป็นอิฐ สำหรับงานก่อสร้างโดยอียิปต์ ถือเป็นชาติแรกที่รู้จักวิทยาการนี้

สำหรับประเทศไทย เริ่มมีการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการก่อสร้าง เมื่อราวปี ค.ศ. 1100 ซึ่งขณะนั้นชนชาวขอมที่เข้ามามีอำนาจอยู่ในดินแดนสุวรรณภูมิ เป็นผู้ริเริ่มนำอิฐมาใช้

อิฐเป็นวัสดุสำหรับก่อผนังกั้นห้อง หรือก่อกำแพงต่างๆ ปัจจุบันวัสดุสำหรับก่อนั้น มีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่อิฐ และคอนกรีตบล็อก การนำไปใช้นั้นต้องอาศัยปูนก่อ และปูนฉาบเป็นตัวยึดเกาะ โดยวัตถุดิบที่ใช้ทำอิฐ ได้แก่ดินเหนียว ดินโคลน หรือวัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่อิฐ เช่นแกลบขี้เถ้า

อิฐที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไปแบ่งออกได้ 4 ชนิด

- อิฐประดับ เป็นอิฐที่ทำจากดินเหนียวโดยใช้เครื่องอัดให้เป็นรูปร่าง อิฐชนิดนี้มีเนื้อเรียบ และแข็งแรงรับน้ำหนักได้ดี ใช้ก่อกำแพงโชว์ไม่ต้องฉาบปูนจะมีอักษรย่อบนแผ่นอิฐ เช่นบ.บ.ท. (บางบัว-ทอง) และบ.ป.ก. (บางปะกง)

- อิฐโปร่ง เป็นอิฐที่ทำจากดินเหนียว โดยใช้เครื่องอัดให้เป็นรูปร่าง เช่นเดียวกับอิฐประดับ แต่ตรงกลางแผ่นจะออกแบบให้เป็นช่องหลายช่องเพื่อให้มีน้ำหนักน้อยลง อิฐชนิดนี้จะมีน้ำหนักเบา แต่จะมีความแข็งแรงดี ใช้ในการก่อกำแพงต่างๆ

- อิฐมอญ เป็นอิฐที่ทำจากดินเหนียว หรือดินโคลน ผสมกับแกลบหรือขี้เถ้า 10 เปอร์เซ็นต์ของอิฐที่ทำขึ้น อิฐมอญที่ขึ้นรูปด้วยแรงคน รูปร่างไม่สม่ำเสมอ นิยมใช้กันมาก เพราะราคาถูก เหมาะสำหรับก่อกำแพง อิฐที่จะต้องฉาบปูน ปัจจุบันได้มีการนำเครื่องจักรมาใช้ในการขึ้นรูป ทำให้ได้รูปร่างของอิฐที่เรียบร้อยขึ้น มีขนาดเท่ากันทุกก้อน ใช้ก่อผนังโชว์ได้

- อิฐทนไฟ เป็นอิฐที่ทำจากดินเหนียวที่มีส่วนผสมของอลูมิน่า และซิลิก้า โดยใช้เครื่องอัดให้เป็นรูปร่าง เป็นอิฐที่ใช้ในการสร้างเตาต่างๆ เช่นเตาถลุงแร่ เตาหลอมโลหะ อิฐทนไฟเป็นอิฐที่ทนความร้อนได้สูงมาก มีเนื้อละเอียดแน่นแข็งแรง (พงษ์เจษฎา, 2540)

ตารางที่ 2.1 ข้อดี และข้อเสียของอิฐมอญ

ข้อดี	ข้อเสีย
1. มีขนาดเล็กขนย้ายง่าย	1. มีขนาดเล็กจึงต้องใช้ความปราณีตในการก่อ
2. ใช้ก่อสร้างทำให้อากาศภายในเย็น	2. ต้องระวังการกระทบกระเทือนเพราะแตกค่อนข้างง่าย
3. ทนไฟ	3. ต้องใช้ดินเหนียวซึ่งบางทีอาจได้ดินที่ไม่ได้มาตรฐาน
4. ราคาถูก	

ที่มา : พงษ์เจษฎา (2540)

2.2 อิฐมวลเบา

การทำอิฐสำหรับก่อสร้างของไทย ได้ทำกันมานานแล้ว โดยส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมครอบครัวในแถบชนบท ซึ่งมีขนาดเล็ก และอิฐที่ผลิตส่วนใหญ่เป็นอิฐมอญ ต่อมาได้มีการตั้งโรงงานใช้เครื่องจักรเข้ามาช่วยมากขึ้น โดยอิฐที่ทำการผลิตมีคุณภาพ และประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่อิฐบล็อกอิฐมวลเบา อิฐโฟม โดยเฉพาะการผลิตอิฐมวลเบา ในปัจจุบันนับได้ว่าเป็นนวัตกรรมวัสดุก่อสร้างแบบใหม่สำหรับวงการก่อสร้างของไทยซึ่งได้รับความนิยมอย่างสูง และเป็นทางเลือกใหม่แก่วงการก่อสร้างเนื่องจากอิฐมวลเบามีสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากอิฐชนิดอื่นๆ คือสามารถนำไปใช้สร้างบ้านได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ประหยัดแรงงาน และลดต้นทุนในการดำเนินการก่อสร้าง รวมทั้งสามารถช่วยประหยัดพลังงาน ป้องกันความร้อนได้ดี มีความคงทน และมีอายุการใช้งานนานกว่า 50 ปี และทั้งนี้ยังนิยมใช้ในงานก่อสร้างตึกสูง ประเภทอื่นๆ เช่นอาคารสำนักงาน โรงแรม และโรงพยาบาล เป็นต้น

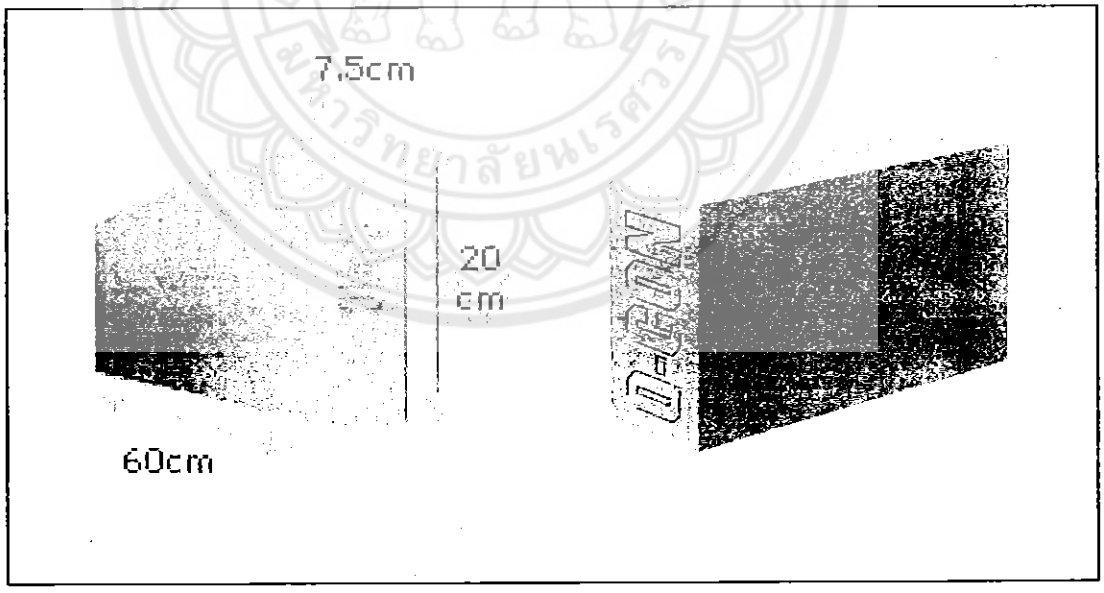
อิฐมวลเบา เป็นวัสดุก่อผนังมาตรฐานใหม่ ที่นำเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัย มาผลิตเป็น “วัสดุก่อผนังมวลเบา” มีลักษณะเป็นคอนกรีตก้อนต้นที่มีมวลเบากว่าคอนกรีตทั่วไป นอกจากนี้อิฐมวลเบายังมีคุณสมบัติอื่นๆ ที่น่าสนใจ คือเกิดฟองอากาศ เนื่องจากการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น การมีฟองอากาศมากประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของอิฐมวลที่ทำขึ้นทำให้เบา (ลอยน้ำได้) ไม่ดูดซึมน้ำ (ดูดซึมน้ำน้อยกว่าอิฐมอญ 4 เท่า) ความเบาก็จะทำให้ประหยัดเวลาในการก่อโครงสร้าง และเป็นฉนวนความร้อน มีค่าการต้านทานความร้อนที่ดีกว่าคอนกรีตบล็อก 4 เท่า ดีกว่าอิฐมอญ 6-8 เท่า ไม่สะสมความร้อน ไม่ติดไฟ ทนไฟ 1,100 องศาเซลเซียส ได้นาน 4 ชั่วโมง กันเสียงได้ดี เมื่อฉาบจะแตกร้าวน้อยกว่า การก่ออิฐฉาบปูน เนื่องจากตัวบล็อกกับปูนฉาบมีส่วนผสมที่ใกล้เคียงกัน และก่อเป็นผนังรับแรง ได้น้ำหนักประมาณ 80 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งอิฐมวลเบา 1 ก้อน เท่ากับอิฐมอญ 18 ก้อน (พงษ์เจษฎา, 2540)

ตารางที่ 2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐมวลเบา

วัตถุดิบ	เปอร์เซ็นต์
1. ทราย	50
2. ซีเมนต์	30
3. ยิปซั่ม	9
4. ปูนขาว	9
5. ผงอลูมิเนียม	2

ที่มา : พงษ์เจษฎา (2540)

ส่วนการลงทุนในเครื่องจักรสำหรับการผลิตอิฐมวลเบา มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง คือมีค่าใช้จ่ายประมาณ 100-500 ล้านบาท โดยเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ระบบสายพานลำเลียง เครื่องโม่/บด/หั่น/ตัด เครื่องกวน/ผสม เครื่องตัด/เลื่อย เครื่องอบแห้ง เครื่องกำเนิดไอน้ำ เครื่องบรรจุกล่อง/ลัง เครื่องทำโครงตาข่าย เครื่องบดทรายเครื่องกวน/ผสม แม่พิมพ์ เครื่องตัด/เลื่อย และเครื่องอบไอน้ำ ขนาดทั่วไปของอิฐมวลเบาที่ผลิตจะมีขนาดความหนา 7.5, 8, 9 และ 20-30 เซนติเมตร ความสูง 20 ความกว้าง 30 เซนติเมตร ความยาว 60 เซนติเมตร สามารถเลื่อยตัดได้เหมือนไม้ ทนแรงกดได้ 30-80 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (อิฐมวลเบาซีแพคเกรดบี, 2552)



รูปที่ 2.1 ขนาดของอิฐมวลเบา

ที่มา : อิฐมวลเบาซีแพคเกรดบี (2552)

2.2.1 ประเภทของอิฐมวลเบา แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

2.2.1.1 ประเภทที่ทำให้มีฟองอากาศข้างในโดยมี "สารก่อฟอง" เป็นตัวช่วยให้เกิดฟองอากาศ เมื่อสารก่อฟองได้รับความร้อน เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดก๊าซขึ้นภายใน ก๊าซจะถูกกักอยู่ภายใน และจะขยายตัวเป็นฟองอากาศใหญ่ขึ้นตามความดันแก๊สที่เพิ่มขึ้นเมื่อเย็นตัวลง ก๊าซที่เกิดขึ้นจะกลายเป็นช่องว่างอยู่ภายในทำให้เกิดโครงสร้างพรุนตัว

2.2.1.2 ใช้สารตัวเติม (Additive) เป็นส่วนผสมให้เบา

2.2.1.3 ใช้วัสดุเบามาทดแทน เช่นใช้โฟมเป็นส่วนผสม (Aggregate) ของทราย และปูนกวนกันเป็นวัสดุมวลเบา เป็นการนำเอาวัสดุที่มีน้ำหนักเบามาผสมกับทราย และปูนทำให้วัสดุนั้นมีน้ำหนักเบามากขึ้น (บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดัคส์, 2550)

ในโครงงานวิจัยนี้ เป็นอิฐมวลจากเศษแก้วจัดอยู่ในประเภท ทำให้มีฟองอากาศภายในโดยมี “สารก่อฟอง” เป็นตัวช่วยให้เกิดฟอง

2.2.2 สมบัติที่โดดเด่นของอิฐมวลเบา

2.2.2.1 สมบัติทางกายภาพอิฐมวลเบาหนา 10 เซนติเมตร เมื่อรวมน้ำหนักวัสดุรวมปูนฉาบจะหนัก 120 กิโลกรัม ในขณะที่อิฐมอญก่อ 2 ชั้น (เว้นช่องว่างตรงกลาง) จะหนัก 180 กิโลกรัม ซึ่งน้ำหนักของการก่ออิฐมอญจะมากกว่า ทำให้ต้องเตรียมโครงสร้าง เพื่อการรับน้ำหนักในส่วนนี้ด้วย ทำให้ต้นทุนโครงสร้างเพิ่มขึ้น

2.2.2.2 การป้องกันความร้อน หากเป็นกรณีปกติ "อิฐมวลเบา" จะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าอิฐมอญ ประมาณ 8-11 เท่า แต่การก่อผนังภายนอก อิฐมวลเบาจะต้องมีความหนา 10 เซนติเมตร และผนังภายในหนา 7 เซนติเมตรขึ้นไป จึงจะสามารถกันความร้อนได้ดี แต่ในกรณีใช้อิฐมอญก่อ 2 ชั้น ตัวช่องว่างตรงกลางจะทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี และอิฐแถวด้านในไม่สัมผัสความร้อนโดยตรง จึงทำให้คุณสมบัติตรงนี้ของอิฐมอญ จะมีความสามารถในการกันความร้อนได้ดีกว่า แต่การเว้นช่องว่างไม่ควรต่ำกว่า 5 เซนติเมตร

2.2.2.3 การกันเสียง ปกติอิฐมวลเบาจะกันเสียงได้ดีกว่า อิฐมอญ ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แต่ในกรณีใช้อิฐมอญก่อ 2 ชั้น ช่องว่างตรงกลางจะทำหน้าที่เป็นฉนวนกันเสียงได้ดีกว่าเกือบ 2 เท่า แต่อิฐมวลเบาจะลดการสะท้อนของเสียงได้ดีกว่า เนื่องจากโครงสร้างของอิฐมวลเบามีฟองอากาศเป็นจำนวนมากอยู่ภายในทำให้ดูดซับเสียงได้ดี จึงเหมาะสำหรับห้อง หรืออาคารที่ต้องการความเงียบ เช่นโรงภาพยนตร์ หรือห้องประชุม

2.2.2.4 การทนไฟ อิฐมอญก่อ 2 ชั้น มีฉนวนตรงกลาง (ช่องว่างตรงกลาง) จะทนไฟได้ดีกว่าอิฐมวลเบาเล็กน้อย และทนไฟที่ 1,100 องศาเซลเซียส ได้นานกว่า 4 ชั่วโมงซึ่งนานกว่าอิฐมอญ 2-4 เท่า ทำให้จะช่วยจำกัดความเสียหายในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ได้

2.2.2.5 ประหยัดพลังงาน เนื่องจากสามารถกันความร้อนได้ดีกว่าอิฐมอญ และยังใช้เครื่องปรับอากาศที่มีขนาดเล็กลงได้ จึงช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคารได้เป็นอย่างดี จึงช่วยประหยัดค่าไฟได้ ถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.2.2.6 ใช้งานง่าย และรวดเร็ว เนื่องจากการผลิตที่เป็นมาตรฐาน ทำให้สินค้าที่ออกมาเท่ากันทุกก้อน ไม่เหมือนกับอิฐมอญ ที่ยังมีความไม่เป็นมาตรฐาน ทำให้การก่อสร้างโดยใช้อิฐมวลเบาจะใช้เวลาในการก่อ และเกิดการสูญเสียน้อยกว่า โดยเฉลี่ยแล้ว ภายใน 1 วันการก่อผนัง โดยใช้อิฐมวลเบาจะได้พื้นที่ 25 ตารางเซนติเมตร ไม่ต้องอาศัยความชำนาญของช่างสามารถตัด แต่งเลื่อย ไส เจาะ และฝังท่อระบบได้โดยใช้เครื่องมือเฉพาะที่ใช้งานง่าย และหาซื้อได้ทั่วไป ขณะที่หากใช้อิฐมอญทำจะก่อได้เพียง 12 ตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดวัสดุอื่นๆ เช่นปูนฉาบ เนื่องจากสามารถก่อฉาบได้บางกว่าช่วยจำกัดความเสียหายในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ได้

2.2.2.7 มิติเที่ยงตรง ขนาดมิติเที่ยงตรงแน่นอนได้ชิ้นงานที่เรียบสวยงาม มีหลายขนาดให้เลือกประหยัดวัสดุ และแรงงานในการก่อฉาบ

2.2.2.8 อายุการใช้งาน ยาวนานเท่าโครงสร้างคอนกรีต (50 ปี) เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว ยิปซั่ม สารกระจายฟอง และเหล็กเส้นจึงมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า อิฐมอญมีส่วนผสมหลัก คือดินเหนียว

ตารางที่ 2.3 ข้อดี และข้อเสียของอิฐมวลเบา

ข้อดี	ข้อเสีย
1. กันความร้อน ทนไฟ และกันเสียง	1. มีราคาแพง
2. น้ำหนักเบา	2. กระบวนการผลิตที่ซับซ้อน
3. ประหยัดพลังงาน	3. ความแข็งแรงต่ำ
4. ใช้งานง่าย และรวดเร็วกว่าอิฐทั่วไป	
5. อายุการใช้งานยาวนาน	

ที่มา : พงษ์เจษฎา (2540)

ทั้งนี้ ไม่ว่าจะใช้วัสดุอิฐมวลเบา หรืออิฐมอญ จะมีข้อดี และข้อเสีย และต้นทุนที่แตกต่างกันไป เช่นก่อผนังด้วยอิฐมวลเบาทั้งหมดราคาค่าก่อสร้างจะมีราคาสูงกว่าการก่อด้วยอิฐมอญชั้นเดียว แต่เมื่อนำอิฐมอญมาก่อผนัง 2 ชั้น ราคาค่าก่อสร้างจะสูงกว่าการก่อสร้างด้วยอิฐมวลเบา เราจะเห็นบางโครงการ จะใช้ทั้งคอนกรีตมวลเบา และอิฐมอญสร้างบ้านหลังเดียว โดยส่วนผนังภายนอกที่ได้รับ

แสงแดดโดยตรงจะก่อด้วยอิฐมวลเบา หรือก่ออิฐมอญ 2 ชั้นส่วนผนังภายในอาจจะก่อด้วยอิฐมอญชั้นเดียว หรืออิฐมวลเบาที่ความหนาน้อยกว่า (พงษ์เจษฎา, 2540)

แนวโน้มในภาพรวมของตลาดอิฐมวลเบาในปี 2548

จะมีแนวโน้มการเติบโตที่ดีขึ้น เนื่องจากกำลังการผลิตอิฐมวลเบาของไทย ไม่เพียงพอกับความต้องการของตลาดที่มีมากกว่า 10 ล้านตารางเมตร ประกอบกับยังมีความต้องการจากโครงการอาคารสูง และงานปรับปรุงซ่อมแซมอาคารที่จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นโอกาสสำหรับผู้ผลิตที่อยู่ในอุตสาหกรรมอิฐมวลเบาที่จะขยายการผลิต และขยายฐานลูกค้าออกไปได้กว้างขวางขึ้น ให้รองรับกับความต้องการที่มีมากขึ้น ตลอดจนมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ให้มีความแตกต่างเพื่อสร้างจุดขายให้มากขึ้น เช่นสามารถเก็บเสียงได้ หรือประหยัดพลังงานได้มากขึ้น ดูดกลืน หรือสะท้อนความร้อนได้ดี เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การผลิตอิฐมวลเบาถึงแม้ว่าแนวโน้มจะมีการขยายการเติบโตของตลาดมากขึ้น แต่ยังคงจำกัดอยู่ในวงผู้ผลิต ที่เป็นธุรกิจขนาดใหญ่เท่านั้น ซึ่งมีเงินลงทุนสูง (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2548)

2.3 วัตถุดิบที่ศึกษา

วัสดุแก้ว "แก้ว" มาจากภาษาอังกฤษว่า "Glass" เป็นวัตถุโปร่งใส เนื้อใสสะอาด มีความเป็นมันแววววาวสุกใส แก้วเป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์ มีลักษณะโปร่งใส และมีความเปราะในตัวเอง ตามมาตรฐานอเมริกา (American Society for Testing and Materials : ASTM) กล่าวว่า แก้ว คือวัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่างๆ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาเย็นตัวลงมาจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่ตกผลึก จากคำนิยามดังกล่าวจะเห็นว่าแก้วมีลักษณะที่เหมือนกับเซรามิก คือแก้วประกอบขึ้นจากสารอนินทรีย์เหมือนกัน และแก้วต้องผ่านการใช้อุณหภูมิสูง แก้วเป็นวัสดุในกลุ่มเดียวกับเซรามิก แต่สิ่งที่ต่างกันระหว่างแก้วกับเซรามิก คือแก้วต้องมีการหลอมตัวก่อนที่จะขึ้นรูป ในขณะที่เซรามิกต้องขึ้นรูปก่อนแก้วจะแข็งตัวโดยไม่มีการตกผลึก จากคำว่าไม่ตกผลึกนี้ทำให้เราโยงไปถึงวัสดุอีกประเภทหนึ่ง คือวัสดุอสัณฐาน (Amorphous materials) ทั้งนี้เนื่องจากแก้วเป็นของแข็งที่ไม่มีผลึกอยู่ในตัวเอง เราจึงถือว่าแก้ว เป็นวัสดุอสัณฐานประเภทหนึ่ง

2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว

ทราย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า "ซิลิกา" จะต้องมีปริมาณของ

- ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide : SiO_2) อย่างน้อย 99.5 เปอร์เซ็นต์
- ปริมาณของเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric-oxide : Fe_2O_3) น้อยกว่า 0.04 เปอร์เซ็นต์

โซดาแอช คือโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium-Carbonate : Na_2CO_3) ในธรรมชาติอยู่ในรูปของโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate : Na_2CO_3) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate : $NaHCO_3*2H_2O$)

หินปูน คือแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide : CaO) หินฟันม้าเป็นสารที่ประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide : SiO_2) และยังมีปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum-oxide : Al_2O_3) ถึงเกือบ 20 เปอร์เซ็นต์ หินโดโลไมต์เป็นสารที่ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide : CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide : MgO) เศษแก้วเป็นวัตถุดิบที่ช่วยประหยัดพลังงานในการหลอม นอกจากนี้ยังมีวัตถุดิบอื่นๆ ซึ่งช่วยในการหลอม การปรับแต่งสีของขวดแก้วรวมทั้งปรับแต่งสมบัติ

2.3.2 ชนิดของแก้ว

การแบ่งประเภทของแก้ว สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่นแบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แบ่งองค์ประกอบทางเคมี หรือแบ่งตามการใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่เรามักจะบอกประเภทของแก้วตามองค์ประกอบ ดังนี้

2.3.2.1 แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass)

ผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือทราย โซดาแอช หินปูน เป็นแก้วที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระจก เป็นต้น สามารถทำให้เกิดสีต่างๆ ได้โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีลงไป

2.3.2.2 แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) หรือ Pyrex

เป็นแก้วที่มีการเติมบอริคออกไซด์ลงไป ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน แก้วที่ได้สามารถนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ ทำภาชนะแก้ว สำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น

2.3.2.3 แก้วตะกั่ว (Lead glass) หรือแก้วคริสตัล

เป็นแก้วที่มีสารผสมของตะกั่วออกไซด์ อยู่มากกว่า 24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเป็นแก้วที่มีดัชนีหักเหสูงมากกว่า แก้วชนิดอื่น ทำให้มีประกายแวววาวสวยงาม และแกะสลักเป็นลวดลายต่างๆ ได้ใช้วัตถุดิบทำเครื่องแก้วที่มีราคาแพง

2.3.2.4 แก้วโอปอล (Opal glass)

เป็นแก้วที่มีการเติมสารบางตัว เช่นโซเดียมฟลูออไรด์ หรือแคลเซียม-ฟลูออไรด์ ทำให้มีการตกผลึก หรือการแยกเฟสขึ้นในเนื้อแก้ว ทำให้แก้วชนิดนี้มีความขุ่น หรือโปร่งแสง เนื่องจากสามารถหลอม และขึ้นรูปได้ง่ายจึงมีต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถทำให้มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้น เมื่อนำไปผ่านขบวนการอบ (Tempering) หรือการเคลือบ (Laminating)

2.3.2.5 แก้วอลูมิโน ซิลิเกต (Alumino silicate glass)

มีอลูมินา และซิลิกาเป็นส่วนผสมหลัก มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนต่ำ และมีจุดอ่อนตัว (Softening point) สูงพอที่จะป้องกันการเสียรูปทรง เมื่อทำการอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์

2.3.2.6 แก้วอัลคาไลน์ เอิร์ท อลูมิโนซิลิเกต (Alkaline-earth aluminosilicate)

มีส่วนผสมของแคมเซียมออกไซด์ หรือแบเรียมออกไซด์ ทำให้มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแก้วตะกั่ว แต่ผลิตง่ายกว่า และมีความทนทานต่อกรด และด่าง มากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

2.3.2.7 กลาส เซรามิก (Glass ceramics)

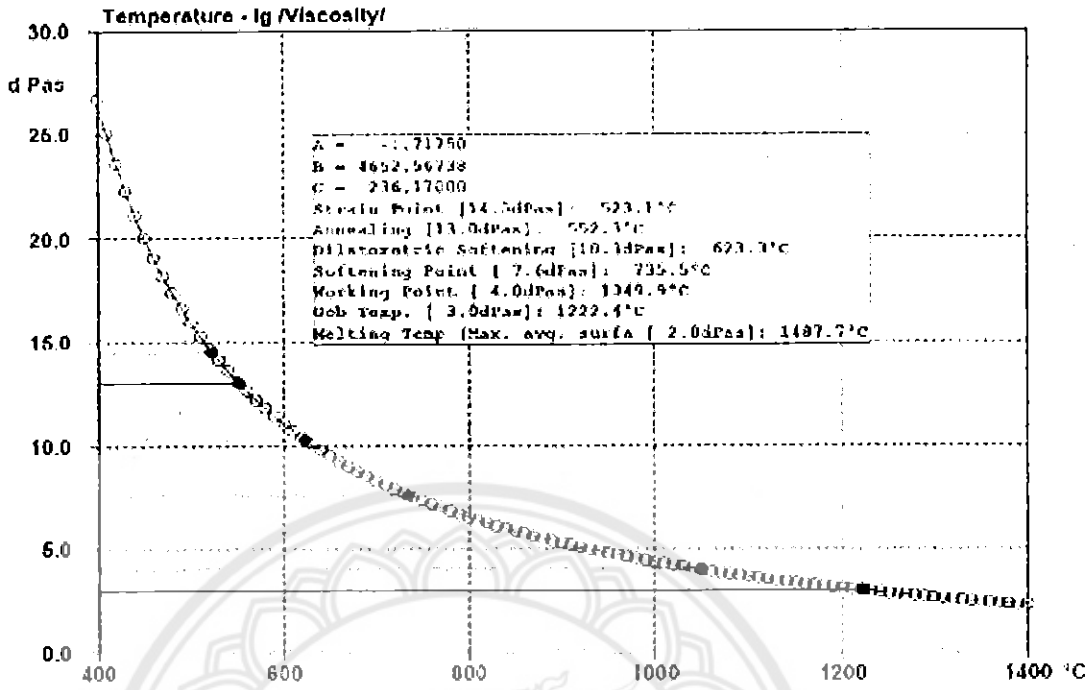
เป็นแก้วประเภท ลิเธียมอลูมิโนซิลิเกตที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium - dioxide : TiO_2) หรือเซอร์คอเนียมออกไซด์ (Zirconium oxide : ZrO_2) ผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งจะทำให้เกิดผลึกในเนื้อแก้ว ซึ่งอาจทำให้แก้วมีความทึบแสง หรือโปร่งใสขึ้นกับชนิดของผลึกกลาสเซรามิกจะทนทาน และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนต่ำมาก สามารถนำไปใช้เป็นภาชนะหุงต้ม หรือเป็นแผ่นบนเตาหุงต้มได้ นอกจากนี้อาจมีแก้วประเภทอื่นๆ อีกหลายประเภท ขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป แต่เนื่องจากอาจไม่มีการใช้ที่แพร่หลายนัก จึงไม่นำมากล่าว (วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแก้ว, 2548)

ดังนั้น โครงงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ เศษแก้วสีชา ชนิดโซดาไลม์ (Soda-lime glass) เนื่องจากแก้วโซดาไลม์นำไปทำเป็นภาชนะ ในการบรรจุเครื่องดื่ม เป็นแก้วที่มีราคาถูก ในขณะเดียวกัน แก้วโซดา-ไลม์ มีจุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ในช่วง 735 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้แก้วจะมีความหนืดลดลง และไหลตัวได้ อนุภาคของแก้วจะเกิดการเชื่อมต่อกันจนเกิดผนึกก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกกักอยู่ภายใน และจะขยายตัวเป็นฟองอากาศใหญ่ขึ้นตามความดันแก๊สที่เพิ่มขึ้น เมื่อแก้วเย็นตัวลงก๊าซจะถูกกักอยู่ภายใน ทำให้เกิดโครงสร้างพรุนตัว เหมาะที่จะนำมาทำอิฐมวลเบา อีกทั้งเป็นแก้วที่หาได้ง่าย และทิ้งเป็นขยะจำนวนมากโดยมีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบเคมีของแก้วสีชา

วัตถุดิบ	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3
เศษแก้วสีชา	70.6	2.1	0.3	11.5	1.9	13.4	0.1	-

ที่มา : วรรณา (2551)



รูปที่ 2.2 ค่าความหนืด-อุณหภูมิของแก้วสีชา
ที่มา : วรรณา (2551)

จากรูปที่ 2.2 แสดงค่าความหนืด-อุณหภูมิของแก้วสีชา แสดงให้เห็นว่าแก้วเริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 735 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้แก้วมีความหนืดลดลง และไหลตัวได้ อนุภาคของแก้วเริ่มเชื่อมต่อกันจนเกิดการผนึกตัว (Viscous flow sintering) แล้ว โดยเฉพาะผิวหน้าของตัวอย่างจะได้รับความร้อนมากกว่าผิวใน ผิวหน้าจะเกิดการผนึกตัวก่อนทำให้ก๊าซเกิดขึ้นภายในตัวอย่างไม่สามารถออกไปจากผิวหน้าของตัวอย่างได้ จึงถูกกักอยู่ภายใน และรวมตัวกัน ทำให้ตัวอย่างมีขนาดใหญ่ ความพรุนตัวมากขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง และความต้านทานแรงอัดลดลง

2.4 สารก่อฟอง (Gasifier or foaming agent)

สารก่อฟอง (Gasifier or foaming agent) ส่วนมากเป็นพวกคาร์บอน หรือสารประกอบของคาร์บอเนต (Carbonaceous substances) ซึ่งสามารถแตกตัวให้ก๊าซเกิดขึ้น เมื่อให้ความร้อนเกิดเป็นฟองอากาศ ทำให้เกิดรูพรุนในอิฐมวลเบา และมีน้ำหนักเบา อุณหภูมิการแตกตัวจะอยู่ในช่วง 400–1000 องศาเซลเซียส (วรรณา, 2551)

ในโครงงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารก่อฟอง 2 ชนิด คือแคลเซียมคาร์บอเนตจากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงมาใช้ในการผลิตอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว เพื่อทำให้อิฐมวลเบาที่ผลิตได้มีน้ำหนักเบาและมีความพรุนตัว

2.4.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)

แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นสารประกอบที่มีสูตรเคมี คือ $CaCO_3$ แคลเซียมคาร์บอเนตไม่ละลายในน้ำ แต่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วกลายเป็นแคลเซียมไบ-คาร์บอเนต ซึ่งมีสูตรเคมี คือ $Ca(HCO_3)_2$, สามารถละลายในน้ำได้เล็กน้อย

ในธรรมชาติพบในรูปดังนี้

- อะราโกไนต์ (Aragonite)
- แคลไซต์ (Calcite)
- ปูนขาว (Chalk)
- หินปูน (Limestone)
- หินอ่อน (Marble)
- ทราเวอร์ตีน (Travertine)

ใช้ประโยชน์ ในงานอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี และอุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นส่วนผสมในยาสีฟัน ผงซักฟอก ยา และเวชภัณฑ์ต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้การผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ เช่นคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ สายหุ้มโทรศัพท์ ฉนวนหุ้มสายไฟ ยางลบ ถุงมือ และแว่นตา (สารานุกรมเสรี, 2545)

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

ชื่อตาม IUPAC	Calcium carbonate
ชื่ออื่น	Limestone , calcite , aragonite , chalk , marble
สูตรเคมี	$CaCO_3$
มวลโมเลกุล	100.09 กรัม/โมล
ความหนาแน่น	2.71 กรัม/ลูกบาศก์เมตร (calcite) 2.83 กรัม/ลูกบาศก์เมตร (aragonite)
จุดแตกตัว	700-900 องศาเซลเซียส
การละลายในน้ำ	0.00015 โมล/ลิตร

ที่มา : สารานุกรมเสรี (2545)

แคลเซียมคาร์บอเนตปูนกลุ่มนี้รู้จักกันทั่วไปเรียกว่าปูนดิบ หินปูนบด หรือปูนเปลือกหอยบด โดยไม่ได้ผ่านกระบวนเผา หรือพรมน้ำ ได้แก่

- ปูนแคลไซต์ (Calcite) เป็นแร่คาร์บอเนต และเป็นแร่ที่เสถียรที่สุดในกลุ่มแร่ที่มีสูตรโครงสร้างเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ส่วนแร่อื่นที่มีสูตรโครงสร้างเดียวกัน ได้แก่อราโกไนท์ (Aragonite) และวาเทอร์ไรต์ (Vaterite) โดยอราโกไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส ส่วนวาเทอร์ไรต์นั้นไม่เสถียร

- ปูนมาร์ล (Marl) เป็นปูนที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต แร่ดินเหนียว และอินทรีย์สารผสมปะปนกันอยู่ทำให้จับตัวเป็นก้อนได้ง่าย เมื่อได้รับความชื้นปูนชนิดนี้จะมีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต ในเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำกว่าปูนแคลไซท์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่า มีปริมาณดินเหนียวและอินทรีย์สารปะปนอยู่มากน้อยเพียงไร ถ้ามีผสมอยู่มากเปอร์เซ็นต์ของแคลเซียมคาร์บอเนตก็จะต่ำ

- ปูนโดโลไมท์ หรือแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($CaMg(CaCO_3)_2$) เป็นปูนที่ได้จากนำหินที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนตมาบดละเอียด สำหรับปูนกลุ่มนี้เมื่อใส่ในน้ำจะให้ธาตุแมกนีเซียม ซึ่งธาตุชนิดนี้ แพลงก์ตอน พืชในน้ำสามารถนำไปใช้ประโยชน์ ในการดำรงชีวิตได้ ดังนั้นในกรณีที่น้ำในบ่อใส การใช้ปูนโดโลไมท์ จะมีผลช่วยเสริมในการทำสีน้ำได้

- อื่นๆ เช่นชอล์ค หินอ่อน ปะการัง ก็มีส่วนประกอบพวกคาร์บอเนต แต่ไม่คุ้มค่าที่จะนำมาใช้เชิงธุรกิจ (สาราณุกรมเสรี, 2545)

2.4.2 เปลือกหอยแครง

เปลือกหอยแครง มีโครงสร้างแบบอราโกไนท์ (Aragonite) ซึ่งเป็นแร่แคลเซียมคาร์บอเนต พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเฟสอราโกไนท์เป็นเฟสแคลไซท์ (Calcite) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยมีโครงสร้างเป็นเฟสแคลไซท์อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นในช่วงอุณหภูมิ 600 - 900 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเปลือกหอยแครงมีการเปลี่ยนแปลงจากเฟสแคลไซท์เป็นเฟสไลม์ (วิเชียร, 2552)

เปลือกหอยแครงซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ และมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบทางเคมี เนื่องจากปัจจุบันสารเคมีนั้นมีราคาแพง ดังนั้นเราจึงหาวัสดุธรรมชาติที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ที่ทำให้เป็นสารเคมี 100 เปอร์เซ็นต์มาทดแทนเพื่อลดค่าใช้จ่าย เปลือกหอยแครงเป็นขยะที่ทิ้งแล้ว จะใช้ระยะเวลาหลายปีในการย่อยสลาย ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระบบนิเวศ ดังนั้นเราจึงนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ (พิทักษ์, 2536)

2.5 สารเชื่อมผสานชนิดโซเดียมซิลิเกต ($NaSiO_3$)

$NaSiO_3$ เป็นสารประกอบด้วย โซเดียมออกไซด์ ซิลิกา และน้ำ ผสมกันอยู่ในอัตราส่วนต่างๆ กัน จึงทำให้มีคุณสมบัติในการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และ$NaSiO_3$ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และถูกนำมาประยุกต์ใช้ได้เพิ่มขึ้นหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของมันเอง

$NaSiO_3$ มีประโยชน์มากสำหรับอุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมก่อสร้าง และกำลังมีบทบาทในฐานะเป็นตัวเชื่อม และทำให้เกิดโครงสร้างของสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยที่ไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม (Geopolymer) และไม่จำเป็นต้องเผาสูงเหมือนการผลิตเซรามิก สำหรับในอุตสาหกรรมเซรามิก ถือว่าเป็นสัดส่วนที่น้อยมากๆ เมื่อเทียบกับการใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ เราเอาไว้ใช้สำหรับเป็นตัวช่วยกระจายลอยตัวเป็นตัวเชื่อมประสาน สำหรับการก่ออิฐเตาเป็นเคลือบใส สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความมัน แบบไม่มากนักเป็นแค่ปิด ผิวจางๆ (สารานุกรมเสรี, 2545)

2.6 เครื่องบด

เป็นการบดวัตถุที่ผ่านการบดหยาบมาแล้ว จนมีขนาดระดับมิลลิเมตร โดยใช้การกระทบกระแทก และการเสียดสีกันระหว่างวัตถุดิบ ตัวลูกบด (Grinding media) และตัวบุผนังของหม้อบด (Lining) การที่เราจำเป็นต้องบดอนุภาคของวัตถุดิบให้มีขนาดละเอียดมาก (ต่ำกว่า 60 ไมโครเมตร) ก็เพื่อที่จะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างการเผาของวัตถุดิบต่างๆ เร็วขึ้นสมบูรณ์ขึ้น เพื่อให้ได้สมบัติต่างๆ เช่นความแข็งแรงหลังเผา เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน และปริมาณเนื้อแก้ว (Glassy phase) ได้ตามที่ต้องการ

เครื่องบดอนุภาคแบบบอลล์มิลล์ (Ball mill)

Ball mill เป็นการบดวัตถุ โดยใช้หลักการหมุนของหม้อบด โดยมีลูกบดอยู่ภายใน สามารถแบ่งได้เป็น การบดแบบเป็นครั้งคราว (Batch mill) และการบดแบบต่อเนื่อง (Continuous mill) โดยการบดทั้งสองแบบนี้ สามารถบดวัตถุได้ทั้งแบบเปียก (Wet milling) และแบบแห้ง (Dry milling)

Batch mill เป็นการบดโดยใช้ Ball mill โดยการเติมวัตถุ และตัวกลางที่ใช้ช่วยในการบด เช่น น้ำ อัลกอฮอล์ โพลีเอธิลีน และ Additive ต่าง ๆ เช่นตัวช่วยการกระจายลอยตัว (Deflocculant) ลงไปใน Ball mill แล้วทำการปิดฝา Ball mill และจึงเริ่มดำเนินการบด จนกระทั่งได้ความละเอียดหรือเวลาตามที่ต้องการจึงทำการถ่ายน้ำสลิปออกมา ซึ่งเป็นการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง การบดแบบ Batch mill นี้สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง คือคุณภาพของน้ำสลิป หรือสีเคลือบที่สม่ำเสมอในแต่ละ Batch ต้นทุนในการผลิต และประสิทธิภาพในการบด

การบดโดยใช้ Batch mill นั้น สามารถบดได้ทั้งแบบแห้ง และแบบเปียก โดยวัตถุดิบที่ต้องการบดนั้น สามารถบดแยกส่วนระหว่างพวกวัตถุดิบ ที่มีความแข็งมาก (Hard materials) โดยมีการเติมดินลงไปบางส่วน เพื่อช่วยในการกระจายลอยตัว แล้วจึงนำสลิปที่ได้ไปผสมรวมกันกับพวกวัตถุดิบที่ไม่แข็ง แต่มีการจับตัวกันอย่างอ่อนๆ (Soft materials)

ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบดแบบ Batch mill เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพ ในการบด สูงสุดนั้น การเติมลูกบดลงไปในหม้อบด (Ball mill) นั้น จะเติมอยู่ที่ประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรภายในทั้งหมดของหม้อบด ซึ่งจากการทดสอบ พบว่าช่วงของการเติมลูกบดในช่วงนี้ จะช่วยให้เวลาในการบดน้อยที่สุด และค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution) จะดีที่สุด

ชนิดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบด การเลือกใช้ลูกบดชนิดต่าง ๆ กันนั้น ขึ้นอยู่กับสิ่งที่เราจะบด ถ้าเป็นเนื้อดินของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเน้นเรื่อง ความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์มากนัก เช่นเนื้อของกระเบื้องปูพื้น บุผนัง เนื้อดินสโตนแวร์ เนื้อดินกระเบื้องหลังคา เราอาจเลือกใช้ลูกบดที่มีมลทิน (Impurities) ปนอยู่ในเนื้อของลูกบดได้ ราคาของลูกบดก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึง รวมทั้งประสิทธิภาพในการบดของลูกบด แต่ละชนิดด้วย แต่ถ้าได้มีการคำนวณเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการบดของลูกบดที่มีค่าความหนาแน่นสูง เช่นลูกบดเนื้ออลูมิน่าแล้ว เราอาจจะลดงบประมาณการลงทุนรวมลงไปได้ เนื่องจากประสิทธิภาพในการบดที่สูงขึ้นทำให้ลดชั่งโมงบดลงไปได้มาก

ขนาดของลูกบด และสัดส่วนในแต่ละขนาดที่ใช้เติมลงในหม้อบด ขนาดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อบดที่เราใช้งาน ขนาดของวัตถุดิบที่เติมลงไปในหม้อบด และความละเอียดของน้ำสลิปที่ต้องการบด โดยลูกบดขนาดใหญ่จะทำหน้าที่บดย่อยวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลง และลูกบดขนาดเล็กจะเป็นตัวทำให้วัตถุดิบเล็กลงได้ตามที่เราต้องการ ลูกบดขนาดเล็กนั้นจะบดวัตถุดิบให้มีขนาดการกระจายตัวของอนุภาคได้แคบกว่าลูกบดขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า การเติมลูกบดที่มีขนาดแตกต่างกันลงไปในหม้อบดนั้น จะช่วยให้การเรียงตัวของลูกบดดีขึ้น คือมีช่องว่างลดลง ทำให้เราสามารถเติมวัตถุดิบลงไปในหม้อบดได้มากขึ้น นอกจากนี้การเติมลูกบดหลายๆ ขนาดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบดให้ดีขึ้น

ชนิดของตัวกรุหม้อบด (Liner) ตัวกรุหม้อบดนั้น ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ตัวชั้นของหม้อบด ซึ่งทำมาจากโลหะ เช่นเหล็ก เกิดการสึกหรอขณะทำการบด เพราะจะทำให้เกิดปนเปื้อนของโลหะ ปนลงไปในสิ่งที่เราจะบดได้ นอกจากนี้ตัวกรุหม้อบดยังทำหน้าที่รับแรงกระแทกของลูกบดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบดด้วย

ความเร็วในการหมุนหม้อบด (Critical speed) ในการบดนั้น จะอยู่ภายใต้แรงสามชนิด ที่จะต้องมีความสัมพันธ์กัน สอดคล้องกัน เพื่อส่งเสริมให้การบดมีประสิทธิภาพสูงสุด แรงทั้งสามชนิดนี้ คือ

- แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational force)
- แรงสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal force)

- แรงเสียดทานระหว่างวัตถุ (Frictional force)

ซึ่งการเคลื่อนตัวของลูกบด วัตถุดิบ และตัวกลางที่ใช้ช่วยในการบดนั้น จะขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุนหม้อบดเป็นหลัก

ตามทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ววิกฤตนั้น วัตถุนั้นจะมีความเร็วเท่ากับความเร็ววิกฤต ในกรณีของลูกบด และวัตถุดิบภายในหม้อบดก็จะไม่เกิดการบด หรือการกระแทกกันขึ้น ความเร็วที่เหมาะสมที่จะทำให้ลูกบดตกกระทบกับวัตถุ เพื่อทำให้เกิดแรงตกกระทบกัน (Impact) และทำให้ลูกบดกับวัตถุดิบ เกิดการบดระหว่างกัน และกัน (Grinding) จะอยู่ที่ 60-80 เปอร์เซ็นต์ของความเร็ววิกฤตขึ้นอยู่กับการบดของนั้นเป็นการบดแห้งหรือว่าบดเปียก

- กรณีที่เป็นการบดเปียก จะใช้ความเร็วที่ 0.7 - 0.8 ความเร็ววิกฤติของการหมุนหม้อบด
- กรณีที่เป็นการบดแห้ง จะใช้ความเร็วที่ 0.6 - 0.7 ความเร็ววิกฤติของการหมุนหม้อบด

ความเร็วนี้ จะทำให้ลูกบดถูกพาขึ้นไป และตกกระทบลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง ถ้าในกรณีที่ความเร็วของหม้อบดมีค่าต่ำเกินไป หม้อบดไม่สามารถที่จะพาลูกบดขึ้นไป เพื่อให้เกิดการตกกระทบลงมาได้ก็จะมีเพียงแรงเสียดทานระหว่างวัตถุเท่านั้น ที่จะทำหน้าที่ในการบดย่อยวัตถุดิบ ซึ่งจะใช้เวลานานมากในการบดวัตถุดิบให้ละเอียดได้ แต่ถ้าความเร็วของหม้อบดเร็วมากกว่าระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ของความเร็ววิกฤต แต่ยังไม่ถึงความเร็ววิกฤต จะเกิดสภาพที่ลูกบดตกกระทบกับวัตถุดิบและลูกบดด้วยกันเองแรงเกินไปจนทำให้เกิดการสึก หรือแตกของลูกบดได้รวดเร็ว สภาพนี้เรียกว่า Cataracting

มุม Cataracting คือมุมที่เหมาะสมที่ความเร็วของหม้อบดยกเอาลูกบดขึ้นไป จนถึงจุดที่สมดุลกันระหว่างแรงสู่ศูนย์กลาง และแรงโน้มถ่วง และทำให้ลูกบดตกลงมากระแทกกับลูกบดอื่นๆ และวัตถุดิบ มุมที่เหมาะสมนี้จะเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส ทำมุมกับแนวเพลาของหม้อบด

ค่าความหนาแน่น (Density) และค่าความหนืด (Viscosity) ถ้าความหนาแน่นต่ำไปจะส่งผลให้ค่าความหนืดต่ำลงไปด้วย ทำให้แรงเสียดทานระหว่างน้ำดินกับลูกบดจะมีน้อย ทำให้บดได้ไม่ดี

วิธีการเติมวัตถุดิบ และตัวช่วยปรับปรุงการไหลตัว นั้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการบดเช่นกัน โดยปกติทั่วไปนั้น จะทำการเติมวัตถุดิบลงไปก่อนแล้วทำการเติมน้ำ และ Deflocculant ลงไป

Deflocculant คือสารที่เติมลงไปเพื่อปรับการไหลตัวของน้ำดิน และเคลือบให้มีการไหลตัวที่ดีขึ้น ซึ่งบางครั้งจะพบปัญหาว่าวัตถุดิบโดยเฉพาะดินจะไปหุ้มตัว Deflocculant เอาไว้จนทำให้ตัว Deflocculant ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะเป็นตัวช่วยกระจายลอยตัวทำให้ความหนืดของน้ำสลิปสูงขึ้น การบดจึงเป็นไปได้ยากขึ้น

การเติมวัตถุดิบที่เหมาะสม คือเติมน้ำลงไปบางส่วนก่อนเพื่อให้น้ำเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างของลูกบดแล้วจึงเติมวัตถุดิบลงไป แล้วจึงเติมน้ำที่เหลือลงไป จะช่วยทำให้สามารถเติมวัตถุดิบได้ในปริมาณที่มากขึ้น หลังจากนั้นปิดฝาหม้อบดแล้วทำการหมุนหม้อบดประมาณครึ่งชั่วโมง แล้วจึงทำการเติมสารช่วยกระจายลอยตัวลงไป วิธีนี้จะช่วยให้สารช่วยกระจายลอยตัวมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้อย่างเต็มที่ และจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบดได้

หลังจากที่ทำการถ่ายน้ำสลิปออกจากหม้อบดแล้วนั้น ถ้ายังมีน้ำสลิปหลงเหลืออยู่ภายในหม้อบดก็จะทำให้ไปกินเนื้อที่ในการ Load วัตถุดิบใน Batch ถัดไป รวมทั้งสัดส่วนในการบดก็จะผิดไป ดังนั้นควรมีการตรวจสอบภายในหม้อบดเสมอๆ ถ้าพบว่ามีน้ำสลิปเหลือค้างจากการถ่ายมากก็ให้ทำการถ่ายต่อ โดยหมุนหม้อบดเพื่อเพิ่มแรง Shear ให้กับน้ำสลิป โดยเฉพาะน้ำสลิปที่มีความเป็น Thixotropic คือสามารถเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวเมื่อได้รับแรง Shear ซึ่งเมื่อทำการถ่ายน้ำสลิปไปนานๆ แล้วความหนืดของน้ำสลิปจะเพิ่มขึ้นอย่างมากทำให้ไม่สามารถจะถ่ายออกได้ นอกจากนี้ถ้าพบว่าน้ำสลิปยังค้างอยู่จนผิดปกติก็อาจต้องทำการล้างหม้อบดให้สะอาด ก่อนทำการเติมวัตถุดิบ Batch ใหม่ลงไป (ไทยเซรามิกส์โซไซตี้, 2550)

2.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

2.7.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงอัด (มอก.409-2525)

2.7.2 มาตรฐานคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ (มอก.1505-2541)

คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามความต้านทานแรงอัดออกเป็น 4 ชั้นคุณภาพโดยชั้นคุณภาพของคอนกรีตมวลเบามีความสัมพันธ์กันดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ชั้นคุณภาพคอนกรีตมวลเบา

ชั้นคุณภาพ	ความต้านทานแรงอัด นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด
2 (G2)	2.5	2.0
4 (G4)	5.0	4.0
6 (G6)	7.5	6.0
8 (G8)	10.0	8.0

ที่มา : มาตรฐานอุตสาหกรรม (2541)

ชั้นคุณภาพของอิฐมวลเบา จะแบ่งออกเป็น 4 ชั้นคุณภาพตามการใช้งาน โดยใช้ค่าความต้านทานแรงอัดเป็นตัวแบ่งชั้นคุณภาพ โดยทั่วไปแล้วอิฐมวลเบาที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้อยู่ 2 ชั้นคุณภาพ คือชั้นคุณภาพ 2 (G2) และชั้นคุณภาพ 4 (G4) ในการเลือกใช้งานของอิฐมวลเบาแต่ละชั้นคุณภาพ จะต้องให้เหมาะสมกับการใช้งานมีดังนี้

- ชั้นคุณภาพ 2 (G2) เหมาะสำหรับโครงสร้างอาคารระบบเสา-คาน
- ชั้นคุณภาพ 4 (G4) เหมาะสำหรับโครงสร้างอาคารระบบไร้เสา-ไร้คาน

และมี บริษัท สมาร์ทคอนกรีต จำกัด ที่ทำอิฐมวลเบาชั้นคุณภาพ 6 (G6) แต่ใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างพื้นฐาน และวัสดุก่อสร้างแบบตกแต่งสำเร็จ เพียงรายเดียว และได้รับรองมาตรฐานจากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) แต่ชั้นคุณภาพ 8 (G8) ยังไม่มีใครทำได้ตามมาตรฐาน (มาตรฐานอุตสาหกรรม, 2541)

2.8 การทดสอบ

2.8.1 การวิเคราะห์วัฏภาค (Phase)

เครื่อง (X-Ray Diffraction : XRD) เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่างใช้วิเคราะห์ และศึกษาคุณลักษณะความเป็นผลึกของวัสดุพร้อมทั้งใช้ในการระบุแร่ธาตุ โดยจะใช้บอกองค์ประกอบและตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสมรวมทั้งสามารถแยกแยะความแตกต่างของเฟสของอะตอมที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในตัวอย่างได้

โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์วัฏภาค (Phase) จะใช้เทคนิคที่เรียกว่าเอ็กซเรย์ดิฟแฟกชัน (X-ray Diffraction: XRD) ซึ่ง XRD นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ และระบุองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของสารที่มีลักษณะเป็นผลึก (Crystalline) และวัสดุที่มีความเป็นผลึกสูงจะให้ลักษณะของพีค (Peak) ที่สูงและแคบ ในขณะที่วัสดุที่มีความเป็นผลึกต่ำ หรือเป็นอสัณฐาน (Amorphous) นั้นจะให้ลักษณะของพีค (Peak) ที่ต่ำ และกว้าง ซึ่งเทคนิค XRD นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งผง (Powders) และผลึกเดี่ยวๆ (Single crystals) (ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์, 2550)

2.8.2 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น คืออัตราส่วน ของมวลต่อปริมาตร โดยจำแนก ความหนาแน่นออกเป็น 4 ชนิด คือความหนาแน่นคริสตัลโลกราฟิก ความหนาแน่นจริง ความถ่วงจำเพาะ และความหนาแน่นปรากฏซึ่งความหนาแน่นแต่ละชนิด มีความแตกต่างกันดังต่อไปนี้

2.8.2.1 ความหนาแน่นคริสตัลโลกราฟิก (Crystallographic density) เป็นความหนาแน่นที่คำนวณได้จากโครงสร้างของผลึกที่ไม่มีจุดพร่องใดเลย แต่เนื่องจากวัสดุทุกชนิดในโลกจะต้องมีความบกพร่องเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ เช่นมีฟองอากาศ มีแร่ หรือมลทินอื่นเจือปน มีโครงสร้างทางผลึกที่ผิดปกติจากที่ควรจะเป็น เป็นต้น ดังนั้นความหนาแน่นที่คำนวณจากโครงสร้างของผลึกของวัสดุที่ถือว่าไม่มีจุดบกพร่องใดเลยนี้จึงเรียกว่า ความหนาแน่นในอุดมคติ

2.8.2.2 ความหนาแน่นจริง (True density) เป็นความหนาแน่นของเนื้อวัสดุที่สามารถทดสอบทดลองหาค่าได้จริงๆ จากอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรของสารทั้งของแข็ง และของเหลว เนื่องมาจากแต่ละโมเลกุลของสารจะมีมวลคงที่ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ดังนั้นความหนาแน่น จึงเป็นสัดส่วนของจำนวนโมเลกุลของสารนั้นในหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

ความหนาแน่นจริง = D / V **(2.1)**

เมื่อ D หมายถึง น้ำหนักชิ้นงานแห้งก่อนต้ม (กรัม)

V หมายถึง ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.8.2.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ใช้สัญลักษณ์ S หรือS.G. หรือSp.G. หรือSp.Gr. หรือถพ. เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของวัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของของไหลมาตรฐาน ซึ่งของไหลมาตรฐานนั้น สำหรับของเหลวใช้น้ำเป็นของไหลมาตรฐาน ส่วนก๊าซใช้ไฮโดรเจน (Hydrogen) หรืออากาศที่อุณหภูมิ และความดันที่กำหนดเป็นมาตรฐาน

เนื่องจากค่าของความหนาแน่นของวัตถุ และความหนาแน่น ของของไหลมาตรฐานจะแปรเปลี่ยนได้ตามอุณหภูมิ ดังนั้นในการใช้ค่าความถ่วงจำเพาะที่ต้องการความละเอียดรอบคอบ หรือต้องการค่าที่ถูกต้องจึงต้องระบุไว้ด้วยว่าเป็นค่าความถ่วงจำเพาะ ที่อุณหภูมิเท่าใด และน้ำที่ใช้เป็นของไหลมาตรฐาน กำหนดให้มีอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะน้ำจะมีความหนาแน่นสูงที่สุดที่อุณหภูมิดังกล่าว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะลดลง

2.8.2.4 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) เป็นความหนาแน่น ที่รวมช่องว่างที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโครงสร้าง (คู่มือปฏิบัติการทดสอบวัสดุ, 2543)

2.8.3 ความพรุนตัว (Porosity)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความพรุนตัว ได้แก่อัตราส่วนของปริมาตรของรูของวัสดุ กับปริมาตรของวัสดุทั้งหมด หรือมวลของวัสดุ โดยการพิจารณาความพรุนตัวจะพิจารณาได้จากหลายด้านตามลักษณะของวัสดุ เช่นพิจารณาความโปร่ง ปริมาณการดูดซึมน้ำ และการรั่วออกของก๊าซหรือของเหลว เป็นต้น (ชูชาติ, 2534)

โครงงานวิจัยนี้ทำการการหาปริมาณรูพรุน โดยการศึกษาปริมาตรของชิ้นงาน และปริมาตรของน้ำที่เข้าแทนที่ในรูพรุนเปิด รวมทั้งยังสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานได้อีกด้วย ซึ่งเมื่อกล่าวถึงการทดสอบเพื่อหาปริมาตร หากชิ้นงานมีลักษณะทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เราสามารถทราบปริมาตรได้จากการคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 (คู่มือปฏิบัติการทดสอบวัสดุ, 2543)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความพรุนตัว} = [\,(W - D) / V\,] \times 100 \qquad \textbf{(2.2)}$$

เมื่อ D หมายถึง น้ำหนักชิ้นงานแห้งก่อนต้ม (กรัม)
W หมายถึง น้ำหนักชิ้นงานหลังต้ม (กรัม)
V หมายถึง ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.8.4 ความต้านทานของแรงอัด (Compressive strength)

แรงดึง และแรงอัดจะเป็นแรงประเภทเดียวกัน คือเป็นแรงตรง (Direct load) เพราะแรงทั้งสองถูกกำหนดให้กระทำผ่านจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัด และอาจทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลง ความยาวเป็นยืดออก หรือหดสั้น เข้าตามทิศทาง ของแรงกระทำ

การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงอัดโดยทั่วไปใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่มีความเปราะ เช่น เหล็กหล่อ และคอนกรีต โดยเครื่องมือที่ใช้ทดสอบคล้ายการทดสอบแรงดึงแต่ใช้แรงอัดแทน หาค่าการหดตัวแทนค่าการยืดตัว ชิ้นทดสอบนิยมใช้เป็นแท่งรูปสี่เหลี่ยม หรือแท่งกลม ทรงกระบอก มีความสูงมากกว่า ความกว้างพอประมาณเพื่อลดการเสียดทานบนผิวสัมผัสของชิ้นทดสอบ โดยขนาดของชิ้นทดสอบจะแตกต่างกัน

การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงอัดจะใช้หลักการเพิ่มความเค้น อัดอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ หน่วยการวัดความแข็งแรงต่อแรงอัดที่ได้ คือนิวตัน/ตารางเซนติเมตร ส่วนข้อจำกัด ของการทดสอบ คือผิวด้านข้างของชิ้นทดสอบ จะต้องเรียบกลมสม่ำเสมอ และวางชิ้นทดสอบให้อยู่กึ่งกลางของตัวกดอัด วัสดุที่นำมาทดสอบ หากเป็นวัสดุที่มีความเหนียวจะเกิดรอยร้าว และพองออกด้านข้าง หากวัสดุมีความอ่อน จะถูกอัดแบนโดย ไม่แตกหัก แต่หากวัสดุมีความเปราะจะแตกหักเป็นรูปกรวย

การทดสอบต้านทานแรงอัดในงานวิจัยครั้งนี้ จะใช้เครื่อง (Universal Testing-Machine : UTM) ตามมาตรฐานการทดสอบ (มอก.409-2525) ดังสมการที่ 2.3 (เอกสิทธิ์, 2522)

$$\text{ความต้านทานแรงอัด} = \frac{\text{แรง}}{\text{พื้นที่ผิวหน้าตัด}} \quad (2.3)$$

เมื่อ แรง คือ แรงที่กระทำสูงสุด (นิวตัน)
พื้นที่หน้าตัด คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางมิลลิเมตร)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผศ.สมบูรณ์ (2548) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิฐมวลเบาจากโฟมเหลือทิ้งผลที่ได้ คือโฟม และคอนกรีตเกาะตัวกันดี จึงเป็นตัวจุดประกายความคิดขึ้นมาว่า ขยะโฟมน่าจะมีประโยชน์มากกว่าที่หลายคนคิด จุดเริ่มต้นของการวิจัยจึงเริ่มขึ้นนับแต่นั้นเป็นต้นมา โดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสำนักงานนโยบาย ผลที่ได้ คือได้อิฐมวลเบาผสมโฟมโดย มีการทดลองนำไปใช้สร้างบ้านจากอิฐมวลเบาผสมโฟม มาได้ประมาณ 5-6 ปีแล้วซึ่งยังไม่พบปัญหา ที่เกิดขึ้นกับตัวบ้านแต่อย่างใด

วรรณา (2551) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาอิฐมวลเบาโดยใช้เศษแก้ว เป็นการพัฒนาการทำอิฐมวลเบาโดยใช้เศษแก้วสีชามาผสมกับสารก่อฟองชนิดหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต และสารก่อฟองโดโลไมต์ในปริมาณต่างๆ โดยใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารเชื่อมประสารในการขึ้นรูป โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 850 องศาเซลเซียส และได้ผลที่ดีที่สุดดังนี้ เศษแก้วสามารถนำมาทำเป็นอิฐมวลเบาได้โดยผสม สารก่อฟองชนิดหินปูน 1 ส่วน หรือโดโลไมต์ 1.5 ส่วน/เศษแก้วบดละเอียด 100 ส่วน และใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารเชื่อมประสาน เพื่อช่วยในการขึ้นรูปให้เป็นก้อนอิฐ เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะได้อิฐมวลเบาที่มีค่าความหนาแน่น 0.30-0.32 กรัม/ลูกบาศก์-เซนติเมตร มีค่าความต้านแรงอัด 5.4-5.6 เมกะปาสคาล และค่าการนำความร้อน 0.60-0.65 วัตต์/เมตร.เคลวิน สามารถนำมาตัดให้มีขนาดต่างๆ ตามที่ต้องการได้

วิเชียร (2552) ได้ศึกษาโครงสร้างผลึกและการสะสมของโลหะในเปลือกหอยแครง เมื่อให้ความร้อนโดยศึกษาในเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟาเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier TransformInfrared Spectroscopy : FTIR) และการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis : TGA) พบว่าเปลือกหอยแครงก่อนให้ความร้อนมีโครงสร้างแบบอราโกไนท์ (Aragonite) ซึ่งเป็นแร่แคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับการศึกษาถึงส่วนประกอบ และระดับความเข้มข้นของธาตุโลหะที่สะสมอยู่ในเปลือกหอยแครง และได้ศึกษาด้วย เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูอาเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์แบบวัดการกระจายพลังงาน (Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence : EDXRF) จากนั้นเมื่อนำผงตัวอย่างไปเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 - 900 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อโครงสร้างของเปลือกหอยแครง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเฟสอราโกไนท์เป็นเฟสแคลไซท์ (Calcite) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยมีโครงสร้างเป็นเฟสแคลไซท์อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นในช่วงอุณหภูมิ 600 - 900 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเปลือกหอยแครงมีการเปลี่ยนแปลงจากเฟสแคลไซท์เป็นเฟสไลม์

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการค้นคว้าข้อมูล และศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว

3.2 วัตถุดิบ และอุปกรณ์

3.2.1 ผงแก้ว จากขวดแก้วสีชา เป็นแก้วชนิดโซดาไลม์

3.2.2 สารก่อฟองได้แก่ เปลือกหอยแครง และ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์

3.2.3 สารเชื่อมประสาน $NaSiO_3$ ชนิดเกรดอุตสาหกรรม

3.2.4 เครื่องชั่งที่มีความละเอียดอ่านได้ 2 ตำแหน่ง

3.2.5 หม้อบดบอลล์มิลล์ (Ball mill) และรางบด

3.2.6 ตะแกรงขนาด 200 เมช (74 ไมโครเมตร) และ 270 เมช (53 ไมโครเมตร)

3.2.7 ตู้อบ และเตาไฟฟ้า

3.2.8 แม่แบบขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2.9 เครื่องทดสอบเชิงกลของวัสดุ ทดสอบแรงอัด เครื่อง (Universal-Test Machine : UTM)

3.2.10 เครื่องวิเคราะห์วัฏภาค (Phase) (X-ray Diffractrometer : XRD)

3.2.11 เวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ (Vernier caliper) สำหรับวัดขนาดของตัวอย่าง

3.2.12 บีกเกอร์ และแท่งแก้วสำหรับคน

3.3 การเตรียมผงแก้ว

3.3.1 ล้างขวดแก้วสีชาให้สะอาด

3.3.2 ทุบขวดแก้วสีชา (บดหยาบ)

3.3.3 นำไปบดละเอียด โดยใช้วิธีการบดแห้ง ด้วยเครื่องบดอนุภาคแบบบอลล์มิลล์ (Ball mill) เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.3.4 นำออกมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช (74 ไมโครเมตร) และค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 270 เมช (53 ไมโครเมตร) การร่อนผ่านตะแกรงโดย ขนาดอนุภาคของแก้วประมาณ 53-74 ไมโครเมตร

3.3.5 อบผงแก้วที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

3.4 การเตรียมผงเปลือกหอยแครง

3.4.1 ล้างเปลือกหอยแครงให้สะอาด

3.4.2 ทุบเปลือกหอยแครง (บดหยาบ)

3.4.3 นำไปบดละเอียด โดยใช้วิธีการบดแห้งด้วยเครื่องบดอนุภาคแบบบอลล์มิลล์ (Ball mill) เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

3.4.4 นำออกมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช (74 ไมโครเมตร) และค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 270 เมช (53 ไมโครเมตร) การร่อนผ่านตะแกรงโดย ขนาดอนุภาคของแก้วประมาณ 53-74 ไมโครเมตร

3.4.5 อบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

3.4.6 นำผงแก้วไปวิเคราะห์วัฏภาค ด้วยเครื่อง XRD

3.5 การเตรียมสารละลาย $NaSiO_3$

3.5.1 เตรียมสารละลาย $NaSiO_3$

3.5.2 เตรียมน้ำสะอาด

3.5.3 นำสารละลาย $NaSiO_3$ และน้ำสะอาดผสมให้เข้ากัน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1

3.6 การเตรียมตัวอย่าง

3.6.1 ชั่งแก้วบดละเอียดเป็นผง จำนวน 100 กรัม

3.6.2 ชั่งผงเปลือกหอยแครง และ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ ในปริมาณต่างๆ ต่อแก้ว 100 กรัม ดังตารางที่ 3.1

3.6.3 ผสมแก้วบดละเอียด และสารก่อฟองเข้าด้วยกันผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 20 นาที และเทส่วนผสมทั้งหมดลงในบีกเกอร์

3.6.4 เติมสารเชื่อมประสาน $NaSiO_3$ ละลายน้ำ 10 มิลลิลิตร

3.6.5 ผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน

3.6.6 เทส่วนผสมที่เข้ากันดีลงในแบบ ปาดผิวหน้าให้เรียบ และใช้แผ่นปิดโมล กดด้วยแรงสม่ำเสมอกัน

3.6.7 ถอดแบบออก ทิ้งตัวอย่างให้แห้ง 1 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

3.6.8 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา

เรื่องสมุด
ปร.
ป 496ผ
2552

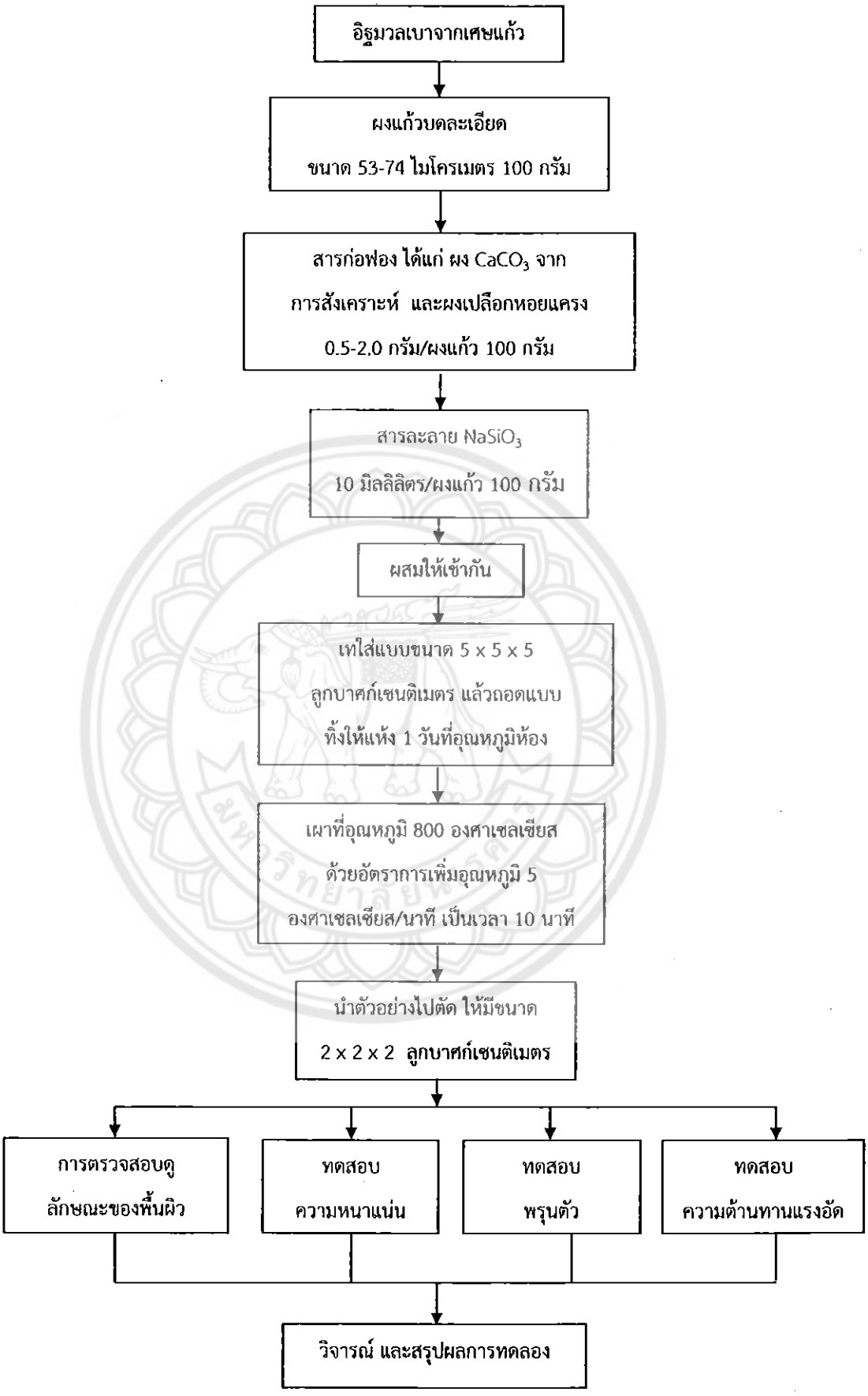
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบแก้ว และสารก่อฟอง

ผงแก้ว (กรัม)	ปริมาณสารก่อฟอง (กรัม)			
100	0.5	1.0	1.5	2.0

หมายเหตุ : ใช้สารเชื่อมประสาน $NaSiO_3$ ขนาด 10 มิลลิลิตร/ผงแก้ว 100 กรัม

สารก่อฟองชนิด - ผงเปลือกหอยแครง

- ผง $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์



รูปที่ 3.1 กระบวนการทำอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว

3.7 การวิเคราะห์วัฏภาค (Phase) ในเปลือกหอยแครง

การวิเคราะห์วัฏภาค (Phase) ของผงเปลือกหอยแครง โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์วัฏภาค (Phase) จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า เอ็กซเรย์ดิฟแฟกชัน (X-ray Diffraction : XRD) ซึ่ง XRD นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ และระบุองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของสารที่มีลักษณะเป็นผลึก (Crystalline) และวัสดุที่มีความเป็นผลึกสูงจะให้ลักษณะของพีค (Peak) ที่สูง และแคบในขณะที่วัสดุที่มีความเป็นผลึกต่ำ หรือเป็นอสัณฐาน (Amorphous) นั้นจะให้ลักษณะของพีค (Peak) ที่ต่ำ และกว้าง ซึ่งเทคนิค XRD นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งผง (Powders) และผลึกเดี่ยวๆ (Single crystals)

ในการเตรียมตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ ถ้าเป็นของแข็งตัวอย่างต้องผ่านการบดด้วยโกร่ง (Mortar) หรือลูกบด เพื่อทำให้เป็นผงละเอียดก่อนจะทำการวิเคราะห์ บดเปลือกหอยเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช หลังจากนั้นทำการอัดผงตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ลงในที่ใส่ตัวอย่าง (Sample holder) แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง XRD (Siemens D500,Siemens AG, Germany) โดยใช้ Ni เป็นตัวกรองรังสี CuK_{α} λ = 1.5406 Å ,2θ = 20-60° และ scan speeds = 0.5 sec/step และใช้เปรียบเทียบกับ Joint Committee Powder Diffraction Standards (JCPDS) และแคลเซียมคาร์บอเนต หมายเลข 01-086-2339 และJCPDS ของอราโกไนท์ หมายเลข 00-005-0453

3.8 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

3.8.1 นำตัวอย่างที่เผาแล้ว มาทำการตัดผิวหน้าออกทุกด้านให้เป็นรูปลูกบาศก์ ตัดตัวอย่างให้มีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดูโครงสร้างโดยรวมของพื้นผิวในปริมาณสารก่อฟองที่แตกต่างกันในตัวอย่างแต่ละก้อน

3.8.2 ถ่ายรูปพื้นผิวของตัวอย่างทุกด้าน ที่กำลังขยาย 3 เท่า

3.8.3 บันทึกผลการตรวจสอบที่ได้

3.8.4 สรุปผลการทดลอง

3.9 การทดสอบความหนาแน่น

3.9.1 ตัดตัวอย่าง ให้เป็นรูปลูกบาศก์ขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์-เซนติเมตร

3.9.2 อบชิ้นงานให้แห้ง ชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งที่มีความละเอียดอ่านได้ 2 ตำแหน่ง บันทึกเป็น D (กรัม)

3.9.3 คำนวณหาปริมาตรของชิ้นงาน กว้าง x ยาว x สูง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.9.4 นำค่าที่ได้คำนวณหาความหนาแน่น ดังสมการที่ 2.1

3.10 การทดสอบความพรุนตัว

การเตรียมตัวอย่าง โดยการตัดตัวอย่างให้เป็นรูปลูกบาศก์ ขนาด 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์-เซนติเมตร โดยทำซ้ำกัน 5 ชิ้น ต่อ 1 ตัวอย่าง

3.10.1 อบชิ้นงานให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็น D (กรัม)

3.10.2 ต้มชิ้นงานในน้ำกลั่นให้เดือดนาน 5 ชั่วโมง และแช่ไว้อีกนาน 24 ชั่วโมง

3.10.3 เช็ดผิวชิ้นงาน ชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็น W (กรัม)

3.10.4 นำค่าจากการทดสอบ มาคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

3.11 การทดสอบความต้านทานแรงอัด

การทดสอบความต้านทานแรงอัดในงานวิจัยครั้งนี้ จะใช้เครื่องทดสอบความต้านทานแรงอัด (Universal Testing Machine : UTM) ตามมาตรฐานการทดสอบ (มอก.409-2525) การเตรียมตัวอย่าง ตัดตัวอย่างเป็นรูปลูกบาศก์ ขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์-เซนติเมตร ด้วยอัตราการกดที่ 1.0 มิลลิเมตร ต่อนาที โดยทำซ้ำกัน 5 ชิ้น ต่อ 1 ตัวอย่าง และคำนวณความต้านทานแรงอัดได้จากสมการที่ 2.3

3.12 วิจารณ์ผลการทดลอง และสรุปผลที่ได้

3.12.1 นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

- เปรียบเทียบสารก่อฟองชนิด เปลือกหอยแครง และ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์
- เปรียบเทียบปริมาณสารก่อฟองที่ใช้ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม/แก้ว 100 กรัม
- เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของอิฐมวลเบาที่ผลิตได้
- เปรียบเทียบความหนาแน่นของอิฐมวลเบาที่ผลิตได้
- เปรียบเทียบความพรุนตัวของอิฐมวลเบาที่ผลิตได้

3.12.2 วิจารณ์ผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

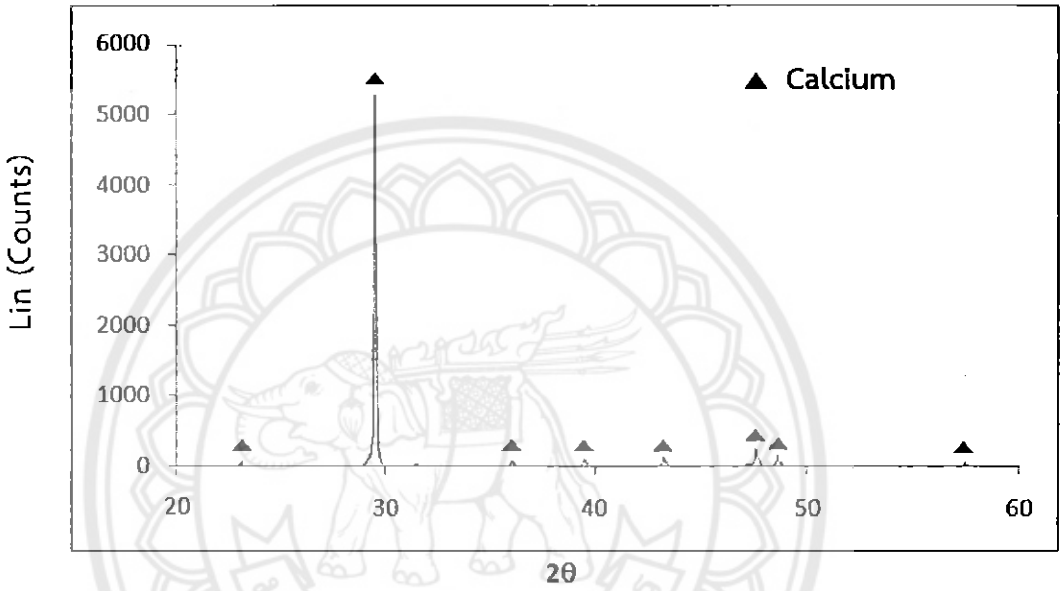
- เปรียบเทียบความต้านทานของแรงอัดของอิฐมวลเบาที่ผลิตได้กับมาตรฐานคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ (มอก.1505-2541)

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

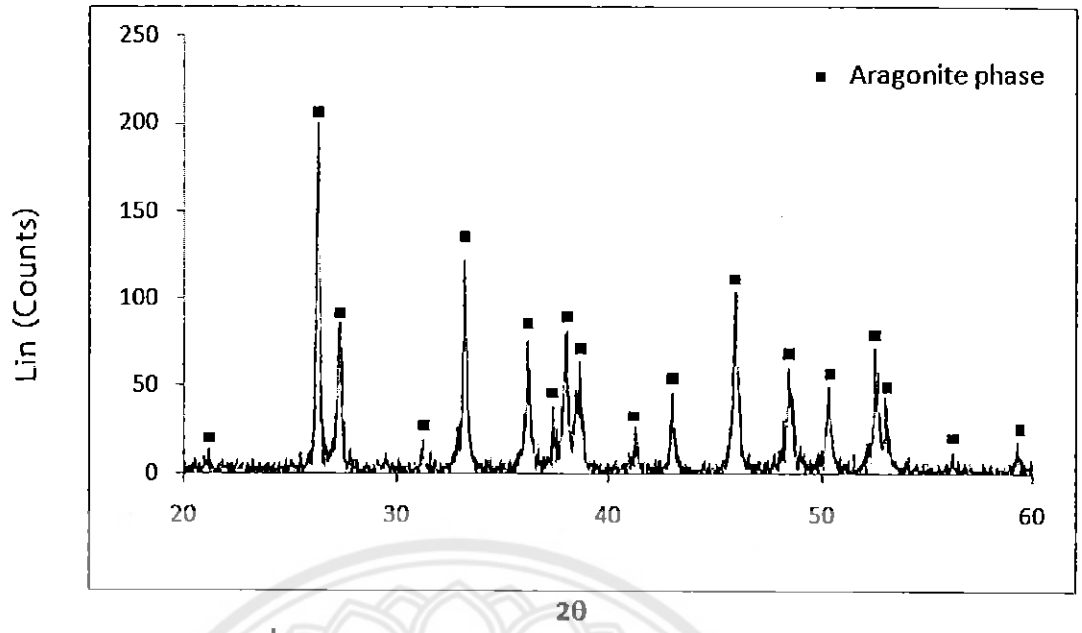
4.1 การวิเคราะห์วัฏภาคของผง $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และผงเปลือกหอยแครง

เปลือกหอยแครงทำการบด เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคของผง $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์

จากรูปที่ 4.1 การวิเคราะห์วัฏภาคของ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ โดยเทคนิค XRD พบพีคของ $CaCO_3$ เมื่อเทียบกับ JCPDS ของแคลเซียมคาร์บอเนต หมายเลข 01-086-2339



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคของผงเปลือกหอยแครง

จากรูปที่ 4.2 การวิเคราะห์วัฏภาคของเปลือกหอยแครง โดยเทคนิค XRD จะพบว่าเปลือกหอยแครงนั้นมีโครงสร้างชนิดอราโกไนท์ ซึ่งเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดหนึ่งมีโครงสร้าง และสูตรเคมีเหมือนกัน คือ $CaCO_3$ โดยเทียบกับ JCPDS ของอราโกไนท์ หมายเลข 00-005-0453

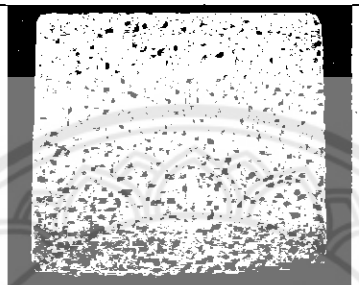
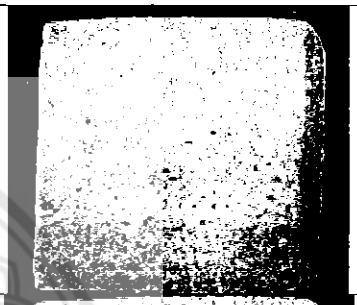
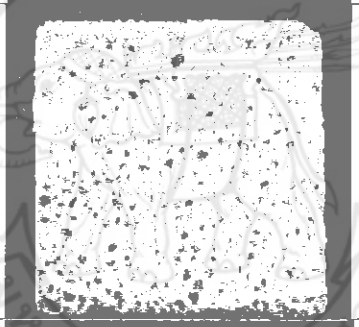
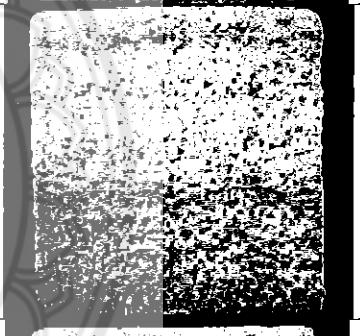
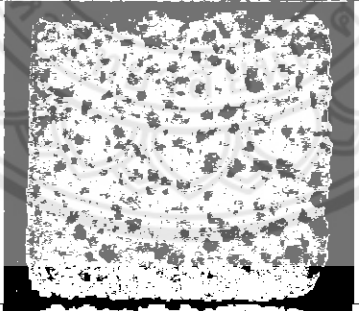
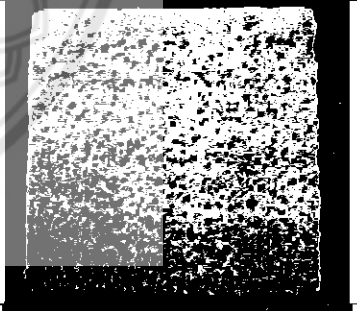
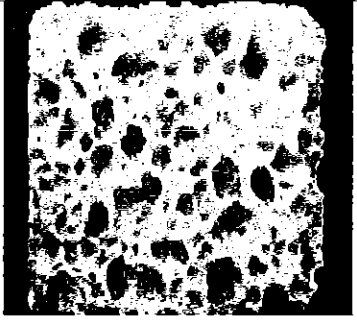
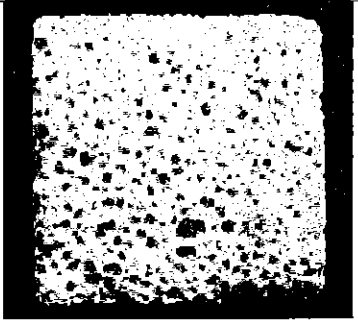
4.2 ผลการศึกษา และเปรียบเทียบของสารก่อฟอง 2 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง

ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง เป็นสารก่อฟอง จากการเตรียมผงแก้ว 100 กรัม/ปริมาณสารก่อฟอง 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม และเติมสารเชื่อมประสาน $NaSiO_3$ ละลายน้ำ 10 มิลลิลิตร ผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน นำมาอัดขึ้นรูปในแม่แบบขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาที เป็นเวลา 10 นาที ตัดตัวอย่างอิฐมวลเบาให้มีขนาด 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์-เซนติเมตร

4.2.1 ผลการตรวจสอบดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว

เมื่อตัดตัวอย่างอิฐมวลเบา ให้มีขนาด 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำมาตรวจดูโครงสร้างโดยรวมของพื้นผิว ถ่ายรูปพื้นผิวของตัวอย่างอิฐมวลเบาทุกด้าน ด้วยกล้องดิจิตอลที่กำลังขยาย 3 เท่า บันทึกผลการตรวจสอบที่ได้

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิว ของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้สารก่อฟอง ชนิด $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ชนิดสารก่อฟอง / ปริมาณ (กรัม)	$CaCO_3$ จากการสังเคราะห์	เปลือกหอยแครง
0.5		
1.0		
1.5		
2.0		

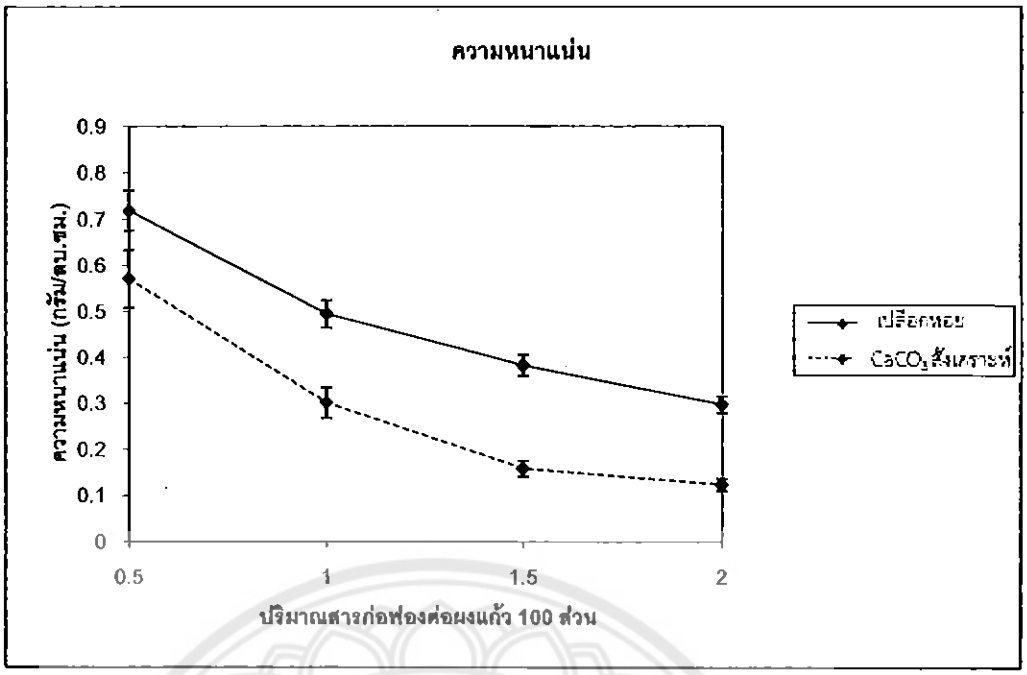
จากการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลาเป็นเวลา 10 นาที มีการขยายตัวมาก ผิวหน้าของชิ้นงานก่อนทำการตัดมีลักษณะเรียบ และเป็นมัน เมื่อนำตัวอย่างมาตัดผิวหน้าออกทุกด้าน จะเห็นลักษณะรูพรุนกระจายทั่วไป และเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟองมากขึ้น ตัวอย่างจะมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และขนาดใหญ่ขึ้น

จากตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์และตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5 กรัม ลักษณะของรูพรุนมีขนาดเล็ก และกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งก้อน เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟองเป็น 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม ตามลำดับจะเกิดการแตกตัวของ $CaCO_3$ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกักอยู่ภายใน ขนาดรูพรุนจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดเพิ่มมากขึ้น ตามปริมาณของสารก่อฟอง ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟองกับอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง พบว่าที่ปริมาณของสารก่อฟองที่เท่ากัน อิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟองนั้น จะมีขนาดของอนุภาคภายในที่ใหญ่กว่าอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง เนื่องจากในปริมาณสารก่อฟองที่เท่ากันเปลือกหอยแครงจะมีปริมาณของ $CaCO_3$ ที่น้อยกว่า จึงแตกตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่า $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ จะต้องเพิ่มปริมาณสารก่อฟอง จากเปลือกหอยแครง

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ผสมสารก่อฟอง 2 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง

ตัวอย่างอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ เป็นสารก่อฟอง และเปลือกหอยแครง เป็นสารก่อฟอง เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัดตัวอย่างอิฐให้มีขนาด 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งตัวอย่างบนเครื่องชั่งที่มีความละเอียดอ่านได้ 2 ตำแหน่ง บันทึกค่าที่ได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ได้ผลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่ใช้สารก่อฟองชนิด $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม

จากรูปที่ 4.3 ความหนาแน่นของตัวอย่างที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟองที่ปริมาณ 0.5 กรัม มีความหนาแน่นสูง (0.571 และ 0.718 ลูกบาศก์เซนติเมตร) เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟองเป็น 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม/แก้ว 100 กรัม พบว่าความหนาแน่นลดลงเรื่อยๆ

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของตัวอย่างที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ เป็นสารก่อฟองกับตัวอย่างที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณสารก่อฟองน้อยจะส่งผลให้มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ภายในตัวอย่างอิฐมวลเบานั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ดังปฏิกิริยาเคมีนี้

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$$

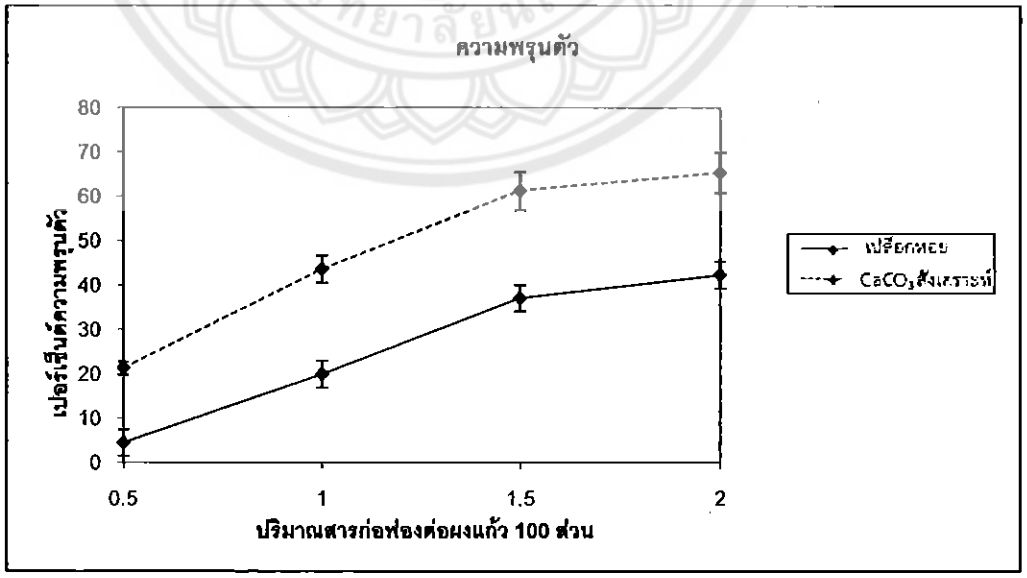
ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นภายในตัวอย่างของอิฐมวลเบา โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไปแทนที่เนื้อของชิ้นงาน และค่าความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้เนื้อชิ้นงานมีโครงสร้างภายในมีรูพรุนมาก และมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากแก้วโซดาไลม์ เริ่มอ่อนตัวที่ 735 องศาเซลเซียส อนุภาคของแก้ว เริ่มเชื่อมต่อกัน เกิดการผนึกตัว (Viscous flow sintering) จึงทำให้ค่าความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อยู่ภายในไม่สามารถดันตัวออกสู่ภายนอกได้ และธาตุที่ยังเหลืออีกตัวหนึ่งที่ถูกกักอยู่ภายในอิฐมวลเบาคือ CaO จะส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อกัน และเกิดการผนึกของแก้วมากขึ้น ทำให้เกิดความหนาแน่นสูงขึ้น น้ำไม่สามารถซึมผ่านตัวอย่างอิฐได้

ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างอิฐมวลเบา ที่มีปริมาณสารก่อฟองเท่ากัน จะเห็นว่าตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง จะมีความหนาแน่นสูงกว่า ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟอง เพราะตัวอย่างอิฐมวลเบาใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟองนั้นมีปริมาณ $CaCO_3$ อยู่ภายในเปลือกหอยน้อยกว่า ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟอง ดังนั้นหากต้องการให้ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่มีเปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง มีความหนาแน่นใกล้เคียงตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟอง จะต้องเพิ่มปริมาณสารก่อฟองในตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟองในปริมาณ 1.0 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม จากปริมาณเดิม เช่นเพิ่มจาก 0.5 เป็น 1.5 กรัม จึงจะมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความพรุนตัวของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ผสมสารก่อฟอง 2 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง

ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟอง และเปลือกหอยแครงเป็นสารก่องฟอง เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัดตัวอย่างอิฐให้มีขนาด 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ชั่งตัวอย่างบนเครื่องชั่ง ที่มีความละเอียดอ่านได้ 2 ตำแหน่ง บันทึกค่าที่ได้

ต้มตัวอย่างในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ปล่อยแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเช็ดผิว ชั่งตัวอย่างบนเครื่องชั่งที่มีความละเอียดอ่านได้ 2 ตำแหน่ง บันทึกค่าที่ได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 ได้ผลดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าความพรุนตัวของอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่ใช้สารก่อฟองชนิด $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม

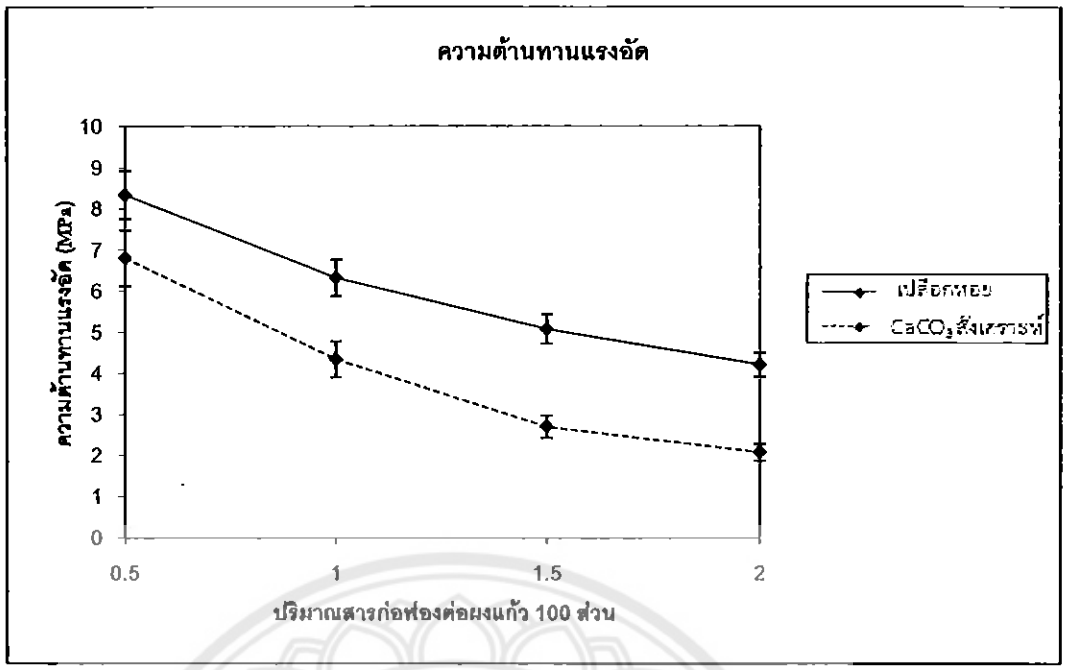
จากรูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวของตัวอย่างมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงเป็นสารก่องฟอง ปริมาณสารก่อฟองที่ปริมาณ 0.5 กรัมมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟองเป็น 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัมตามลำดับ พบว่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวสูงมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟองมากขึ้น แต่ความหนาแน่นจะลดลง

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวของตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์กับตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟองจะมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวสูงกว่า ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟองที่ปริมาณสารก่อฟองเท่ากัน จากผลจากการวิเคราะห์ (X-Ray Diffraction : XRD) จะเห็นได้ว่า จากตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟองจะมี $CaCO_3$ เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สูงกว่า ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง ดังนั้นจึงสอดคล้องกับตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟองสามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของ $CaCO_3$ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกักอยู่ภายในขนาดรูพรุนจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดมากกว่าตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง และทำให้โครงสร้างภายในมีความพรุนตัว และมีการดูดซึมน้ำมากกว่าอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง เมื่อมีการดูดซึมน้ำสูง จะส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวสูงตามไปด้วย

จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวของตัวอย่างอิฐที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟองนั้นสูงกว่าตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณสารก่อฟองน้อย จะส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวของตัวอย่างอิฐมวลเบาต่ำลง และที่ปริมาณสารก่อฟองมาก จะส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวของตัวอย่างอิฐมวลเบาเพิ่มมากขึ้น

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ผสมสารก่อฟอง 2 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง

ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟอง และเปลือกหอยแครงเป็นสารก่องฟอง เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัดตัวอย่างอิฐมวลเบาให้มีขนาด 2 x 2 x 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบด้วยเครื่อง (Universal Test Machine : UTM) ด้วยอัตราการกดที่ 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทำซ้ำกัน 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานแรงอัด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 ได้ผลดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้วที่ใช้สารก่อฟองชนิด $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม

จากรูปที่ 4.5 ความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟองที่ปริมาณ 0.5 กรัม มีค่าความต้านทานแรงอัดที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบสารก่อฟองในปริมาณที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ค่าความต้านทานแรงอัดจะต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณของสารก่อฟอง

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์กับตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์จะมีความต้านทานแรงอัดที่ต่ำกว่า ตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง เพราะตัวอย่างอิฐมวลเบาที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟองมีความหนาแน่นต่ำกว่าอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวสูงกว่าอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง จึงส่งผลให้มีความต้านทานแรงอัดที่ต่ำกว่าอิฐมวลเบาที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเพิ่มปริมาณของสารก่อฟอง ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ และเปลือกหอยแครง ส่งผลทำให้ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างอิฐมวลเบาจากเศษแก้วมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น ค่าความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัดของอิฐลดลง แต่มีความพรุนตัวสูงขึ้น

5.1.2 สารก่อฟองชนิด $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ 1 กรัม/เศษแก้วบดละเอียด 100 กรัม ใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารเชื่อมประสาน เพื่อช่วยในการขึ้นรูป และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จะมีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 0.301 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์ความพรุนตัว เท่ากับ 43.66 และค่าความต้านทานแรงอัด เท่ากับ 4.340 เมกะปาสคาล

5.1.3 การใช้สารก่อฟองที่ได้มาจากเปลือกหอยแครงต้องใช้ในปริมาณ 2 กรัม/ผงแก้วบดละเอียด 100 กรัม และใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารเชื่อมประสาน เพื่อช่วยในการขึ้นรูป และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่น 0.296 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีความพรุนตัว 42.34 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 4.207 เมกะปาสคาล

5.1.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบความต้านทานแรงอัด พบว่าใช้อัตราส่วนของสารก่อฟอง $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ กับเปลือกหอยแครง โดยต้องใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ 1 กรัม/ผงแก้วบดละเอียด 100 กรัม และต้องใช้เปลือกหอยแครง 2 กรัม/ผงแก้วบดละเอียด 100 กรัม จึงให้ค่าความต้านทานแรงอัดตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.1505-2541) ชั้นคุณภาพ 4 คือ ต้องมีความต้านทานแรงอัดไม่ต่ำกว่า 4.0 เมกกะปาสคาล

5.2 ข้อแสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการทดสอบการกันความร้อน และการทดสอบการป้องกันเสียง เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของอิฐมวลเบาที่เด่นชัดมากยิ่งขึ้น

5.2.2 แคลเซียมออกไซด์ในแก้วมีหน้าที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมแก้วให้ต่ำลง แต่เนื่องจากเรายังไม่ได้ทำการเผาจนถึงอุณหภูมิที่แก้วหลอม แต่งานวิจัยนี้ได้ทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แคลเซียมออกไซด์จึงไม่มีผลต่อแก้วและสมบัติอื่นๆ ของตัวอย่าง หากต้องการศึกษาผลกระทบของแคลเซียมออกไซด์ในด้านอื่นๆ ควรทำการวิเคราะห์วัฏภาคของแคลเซียมออกไซด์โดยเฉพาะ

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา

5.3.1 ในการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเครื่อง (X-ray Diffractrometer : XRD) นั้นจะแสดงให้เห็นเฉพาะธาตุที่มีโครงสร้างเป็นผลึก แต่ธาตุอื่นๆ ที่มีอยู่ในเปลือกหอยแครงนั้นไม่มีโครงสร้างเป็นผลึก เราจึงไม่เห็นผลของการวิเคราะห์ในธาตุอื่นๆ หากต้องการเห็นวัฏภาคของธาตุอื่นๆ ที่ประกอบอยู่ในเปลือกหอยแครง ควรจะมีการวิเคราะห์ธาตุอื่นๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ เช่น การวิเคราะห์ด้วยวิธี (X-Ray Fluorescence : XRF)

5.3.2 ในการต้มตัวอย่างในน้ำกลั่น เพื่อหาปริมาตรของรูพรุน อาจเกิดการผิดพลาด เพราะระหว่างการต้มตัวอย่างอิฐในน้ำกลั่น น้ำกลั่นไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้ดี เนื่องจากโครงสร้างของตัวอย่าง ลักษณะของรูพรุนนั้น เป็นแบบรูพรุนปิด (Closed Porosity) จึงทำให้ตัวอย่างไม่สามารถจมน้ำได้ ควรมีเครื่องมือในการหาปริมาตรของรูพรุนที่เฉพาะ และแม่นยำมากกว่านี้

5.3.3 ในการตัดผิวหน้าของตัวอย่างไม่ได้ระนาบ ควรมีเครื่องมือเฉพาะ เพราะจะทำให้ได้ระนาบทั้งก้อน และรวดเร็ว

5.3.4 ในการผสมควรทำให้ผงแก้ว และสารก่อฟองแห้งและไม่มีความชื้น โดยใช้เครื่องผสมสาร (Homogenizer) ในการผสมจึงจะทำให้สารก่อฟองกระจายตัวได้ดี และจะช่วยให้ผงแก้วกับสารก่อฟองเข้ากันได้ดี

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2548) สืบค้นเมื่อ 2 สิงหาคม 2552, จาก www.dip.go.th

แก้ว สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก www.mew6.com/composer/package/package_30.php

คาเฟ่ดอทคอม สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก www.212cafe.com/freewebboard/viewcomment.php?alD=13711200&user=thaiearthworms&id=140&page=2&page_limit

ดร.สุมาลี ลิขิตวนิชกุล .(พฤษภาคม-สิงหาคม.2546). ปีที่ 7. **แก้วสำหรับในครัวเรือน เซรามิกส์**, ฉบับที่ 16 หน้า 56-58.

ไทยเซรามิกส์โซไซตี้ (2550) สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php

บริษัท พรอสเพอริตี้ คอนกรีต จำกัด. สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก www.pros-concrete.com

บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดัคส์ จำกัด (2550) สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก www.qcon.co.th/profiles/company_pro.php

พิทักษ์ ลิ้มสกุล (2536) หน้า 156; กระทรวงอุตสาหกรรม, 2529, หน้า 6 – 7

แผนกวิชาช่างโยธา (2543) **คู่มือปฏิบัติการทดสอบวัสดุ**, (ปรับปรุงครั้งที่ 1/2543) เอกสารประกอบการเรียน แผนกวิชาช่างโยธา วิทยาลัยเทคนิคดุสิต กรมอาชีวศึกษากระทรวงศึกษาธิการ สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2552

โรงงานอิฐมอญพงษ์เจษฎา(2540) สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก www.pongjadesada.com/article/id6.aspx

วรรณา ต.แสงจันทร์ (2551) **การพัฒนาอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ** สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2552 จากกรมวิทยาศาสตร์บริการ

วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแก้ว (2548) สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก www2.mtec.or.th/th/research/GSAT/glassweb/define.html

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี (2545) สืบค้นเมื่อ 1 กรกฎาคม 2553, จาก www. th.wikipedia.org/wiki/แคลเซียม คาร์บอเนต

วิเชียร ศิริพรม (2552) **การศึกษาโครงสร้างผลึก และการสะสมของโลหะในเปลือกหอยแครง** วิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ สืบค้นเมื่อ 11 พฤษภาคม 2554 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ (2550) สืบค้นเมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม 2554 จากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (25-26 มกราคม 2549). **การผลิตอิฐมวลเบาจากวัสดุรีไซเคิล.** การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, ประเทศไทย, สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2552 หน้า 586-589.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2541). **ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ - อบไอน้ำ.** กระทรวงอุตสาหกรรมกรุงเทพ, สืบค้นเมื่อ 16กรกฎาคม 2552 หน้า 1-12

สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก www.tisi.go.th

อิฐมวลเบา ซีแพค เกรด บี (2552) สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2552, จาก www.onestock home.com

เอกสิทธิ์ บุตรลับ (2522) **ปฏิบัติการทดสอบวัสดุ**, ภาควิชาวิศวกรรมก่อสร้าง วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษาวิทยาเขตเทเวศร์ สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2552

The United State Pharmacopeia.Container. USP 24. P1930-1932. **สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.** มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบความทนทานของภาชนะแก้วบรรจุยา. มอก.501-2527. สืบค้นเมื่อ 6 สิงหาคม 2552, หน้า 1-2

ภาคผนวก ก

ค่าความหนาแน่น ค่าความพรุนตัว และค่าความต้านทานแรงอัด

ตารางที่ ก.1 ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้เปลือกหอยแครง เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม (กรัม/ลบ.ซม.)

ลำดับ	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.) ที่ปริมาณสารก่อฟอง			
	0.5 กรัม	1.0 กรัม	1.5 กรัม	2.0 กรัม
1	0.729	0.503	0.387	0.294
2	0.708	0.496	0.385	0.298
3	0.719	0.491	0.383	0.300
4	0.723	0.488	0.381	0.298
5	0.715	0.490	0.376	0.294
ค่าเฉลี่ย	0.718	0.493	0.382	0.296
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.008	0.006	0.004	0.003

ตารางที่ ก.2 ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม (กรัม/ลบ.ซม.)

ลำดับ	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.) ที่ปริมาณสารก่อฟอง			
	0.5 กรัม	1.0 กรัม	1.5 กรัม	2.0 กรัม
1	0.590	0.300	0.168	0.123
2	0.600	0.295	0.160	0.124
3	0.570	0.319	0.158	0.125
4	0.598	0.291	0.154	0.123
5	0.498	0.300	0.150	0.124
ค่าเฉลี่ย	0.571	0.301	0.158	0.124
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.043	0.011	0.007	0.001

ตารางที่ ก.3 ค่าความพรุนตัวของอิฐมวลเบา จากเศษแก้วที่ใช้เปลือกหอยแครง เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม (เปอร์เซ็นต์)

ลำดับ	ความพรุนตัว (เปอร์เซ็นต์) ที่ปริมาณสารก่อฟอง			
	0.5 กรัม	1.0 กรัม	1.5 กรัม	2.0 กรัม
1	4.550	19.175	37.588	40.400
2	4.538	19.000	37.125	44.150
3	4.438	20.750	37.638	41.388
4	4.338	20.225	36.775	44.387
5	4.650	20.513	36.400	41.375
ค่าเฉลี่ย	4.503	19.933	37.105	42.340
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.119	0.796	0.530	1.807

ตารางที่ ก.4 ค่าความพรุนตัวของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์ เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม (เปอร์เซ็นต์)

ลำดับ	ความพรุนตัว (เปอร์เซ็นต์) ที่ปริมาณสารก่อฟอง			
	0.5 กรัม	1.0 กรัม	1.5 กรัม	2.0 กรัม
1	21.063	45.763	62.025	64.525
2	20.725	42.588	62.475	66.150
3	22.900	42.037	62.813	65.450
4	20.975	44.700	57.338	65.450
5	20.838	43.213	61.525	64.975
ค่าเฉลี่ย	21.300	43.660	61.235	65.310
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.904	1.540	2.232	0.607

ตารางที่ ก.5 ค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม (MPa)

ลำดับ	ความต้านทานแรงอัด (MPa) ที่ปริมาณสารก่อฟอง			
	0.5 กรัม	1.0 กรัม	1.5 กรัม	2.0 กรัม
1	8.566	6.236	5.091	4.099
2	8.019	6.458	5.141	4.149
3	8.443	6.056	5.113	4.269
4	8.607	6.037	5.027	4.176
5	8.061	6.803	5.039	4.344
ค่าเฉลี่ย	8.339	6.318	5.082	4.207
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.280	0.319	0.048	0.098

ตารางที่ ก.6 ค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว ที่ใช้ $CaCO_3$ จากการสังเคราะห์เป็นสารก่อฟอง ที่ปริมาณ 0.5-2 กรัม/ผงแก้ว 100 กรัม (MPa)

ลำดับ	ความต้านทานแรงอัด (MPa) ที่ปริมาณสารก่อฟอง			
	0.5 กรัม	1.0 กรัม	1.5 กรัม	2.0 กรัม
1	7.665	4.285	2.554	2.234
2	6.602	4.536	2.809	1.934
3	6.736	4.142	2.541	2.029
4	6.143	4.667	2.634	2.116
5	6.858	4.072	2.946	2.015
ค่าเฉลี่ย	6.801	4.340	2.697	2.066
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.554	0.255	0.176	0.114