

## บทที่ 2

### ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปริมาณผลผลิตหอยสองฝาและลักษณะทั่วไปของเปลือกหอย

##### 2.1.1 ปริมาณผลผลิตหอยสองฝา

หอยสองฝา (Bivalves) เป็นสัตว์เศรษฐกิจที่มีการเพาะเลี้ยงจำนวนมากมายทั่วโลก มีมูลค่าการค้าปีหนึ่ง ๆ กว่าพันล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ซึ่งเกือบร้อยละ 80 ของผลผลิตหอยสองฝาของโลกมาจากการเพาะเลี้ยง โดยผลผลิตหอยสองฝาทั้งหมดแต่ละปีมีประมาณ 11 ล้านตัน สายพันธุ์ของหอยสองฝาที่นิยมเพาะเลี้ยงกันมากที่สุดในโลก ได้แก่ หอยนางรม ปริมาณผลผลิตหอยนางรมคิดเป็นร้อยละ 35 ของหอยสองฝาทั้งหมด ส่วนสายพันธุ์ที่นิยมมากรองลงมา คือ ตระกูลหอยลาย หอยแครง และหอยกาบ คิดเป็นร้อยละ 33 ของผลผลิตหอยสองฝาทั้งหมด ส่วนอันดับที่สาม ได้แก่ หอยแมลงภู่ มีสัดส่วนร้อยละ 16 (รพีพร สุทาธรรม, 2544, น.1-2)

#### ตารางที่ 2.1

ปริมาณผลผลิตหอยน้ำเค็มทั้งหมด จำแนกเป็นรายชนิด ปี พ.ศ. 2544-2549

ปริมาณ: 1,000 ตัน

| ปีพุทธศักราช                 | 2544  | 2545  | 2546  | 2547  | 2548  | 2549  |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ชนิดหอย                      |       |       |       |       |       |       |
| หอยแครง (Blood Cockle)       | 77.2  | 82.0  | 69.8  | 72.1  | 58.8  | 65.7  |
| หอยแมลงภู่ (Green mussel)    | 148.5 | 291.0 | 263.9 | 261.7 | 270.7 | 229.7 |
| หอยนางรม (Oyster)            | 20.6  | 11.2  | 26.6  | 27.5  | 19.1  | 18.7  |
| หอยลาย (Short necked clam)   | 52.5  | 31.7  | 50.6  | 28.9  | 18.1  | 22.1  |
| หอยอื่นๆ (Other shellfishes) | 2.0   | 1.3   | 2.1   | 5.1   | 4.3   | 4.5   |
| รวมหอย                       | 300.8 | 417.2 | 413.0 | 395.3 | 371.0 | 342.1 |

ที่มา: กรมประมง, 2549.

สำหรับสถิติผลผลิตสัตว์น้ำประเภทหอยทะเลของไทย ดังตารางที่ 2.1 ในการสำรวจเฉพาะกลุ่มหอยเศรษฐกิจ ไม่รวมปลาหมึก เป็นปริมาณผลผลิตจากฟาร์มเลี้ยงหอยในแนวพื้นที่ชายฝั่งทะเลของไทย ได้แก่ หอยนางรม หอยแครง หอยแมลงภู่ หอยกะพง หอยมุก ผลผลิตหอยแมลงภู่จากปึกโป๊ะ และชนิดที่เก็บรวบรวมจากธรรมชาติ ได้แก่ หอยลาย หอยเชลล์ เป็นต้น และจากข้อมูลดังกล่าว พบว่าชนิดของหอยที่เป็นผลผลิตของประเทศไทยมี 4 ชนิด ที่เป็นที่ยอมรับเลี้ยงหรือจับกันมากที่สุด ได้แก่ หอยนางรม หอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยลาย

### 2.1.2 การศึกษาลักษณะทั่วไปของเปลือกหอย

หอยเป็นสัตว์ที่อยู่ในไฟลัมมอลลัสกา ซึ่งเป็นตระกูลของสัตว์ที่มีจำนวนมากเป็นอันดับสองรองจากแมลง ปกติแล้วสัตว์ในไฟลัมมอลลัสกาจะประกอบด้วยหอย ปลาหมึก และลึนทะเล เป็นต้น สัตว์ที่อยู่ในไฟลัมนี้มีประมาณ 100,000 ชนิด โดยหอยที่มีสองฝาจะมีลำตัวอ่อนนุ่มและเป็นเมือกใส เนื่องจากมีลำตัวอ่อนนุ่มจึงจำเป็นต้องมีเปลือกแข็งห่อหุ้มลำตัวไว้อีกชั้นหนึ่ง ดังนั้นหอยโดยทั่วไปจึงมีเปลือกแข็งหุ้ม (วันทนา อยู่สุข, 2539) โดยเปลือกหอยจะประกอบด้วยชั้นของเปลือก 3 ชั้นดังนี้

- 1) เพริโอสตรัคัม (Periostracum) เป็นชั้นนอกสุด เป็นแผ่นบางมีสี ส่วนประกอบทางเคมีเป็นสารโปรตีนที่แข็งเหมือนโปรตีนของเขาสัตว์ มีชื่อเฉพาะว่า คอนคิโอลิน (Conchiolin)
- 2) ปริสมติก (Prismatic) เป็นชั้นกลางที่หนาและแข็งแรงที่สุด มีความหนามากกว่าชั้นอื่น ส่วนประกอบทางเคมีเป็นผลึกทรงสูงของแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) อยู่อัดตัวกันแน่น และเรียงตั้งฉากกับชั้นแรก ทั้งนี้ยังพบผลึกของแคลไซต์และอะราโกไนต์ในชั้นนี้
- 3) เนครีอัส (Nacreous) เป็นชั้นในสุด เป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอะราโกไนต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนบางและมันวาวเรียงซ้อน ๆ กัน เรียกว่า ชั้นมุก เพราะเป็นบริเวณที่มีการสร้างมุก

โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของเปลือกหอย ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งส่วนใหญ่มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 โดยที่แคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยมีโครงสร้างผลึกแบ่งเป็น 3 แบบ ดังนี้

- 1) แคลไซต์ (Calcite) มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นรูปทรงลูกบาศก์ที่มีหน้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหกหน้าหรือที่เรียกว่า รอมโบอีดรอน (Rhombohedral) มีความถ่วงจำเพาะ 2.71 มีความแข็งปานกลาง

2) อะราโกไนท์ (Aragonite) มีลักษณะผลึกเป็นแท่งปริซึมหรือแท่งพีรามิดคู่ เรียกว่า ออโธโรมบิก (Orthorhombic) ซึ่งมักจะเกิดการรวมตัวกันมีรูปร่างคล้ายดอกกุหลาบ มีความถ่วงจำเพาะ 2.93 และมีความแข็งมากกว่าแคลไซต์ เมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นแคลไซต์

3) วาเทอไรท์ (Vaterite) มีลักษณะผลึกทรงกลม

### 2.1.3 ชนิดของเปลือกหอยสองฝาที่ศึกษา

เปลือกหอยที่ศึกษามีทั้งหมด 4 ชนิด เป็นผลผลิตที่เป็นที่นิยมเลี้ยงหรือจับกันมากที่สุดในประเทศไทย ได้แก่ หอยลาย หอยแมลงภู่ หอยนางรม และหอยแครง (กรมประมง, 2551) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) หอยลาย มีชื่อสามัญว่า “หอยลาย” ชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า “Undulated Surf Clam or Short Necked Clam” ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า “Paphia undulata” หอยสองฝาที่พบมากบริเวณแถบชายฝั่งทะเลที่เป็นโคลนน้ำลึกไม่เกิน 8 เมตร โดยหอยลายจะขุดรูอยู่ใต้พื้นผิวดินลึกประมาณ 20 เซนติเมตร ปริมาณเปลือกของหอยลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเนื้อหอย ซึ่งมีเปลือกประมาณร้อยละ 70 - 75 โดยน้ำหนัก โดยลักษณะของเปลือกจะหนา รูปร่างแบนรี มีลวดลายสีน้ำตาลเข้มตัดกันเป็นแนวเฉียง พื้นสีเหลืองอมน้ำตาลหรือบางตัวมีสีน้ำตาลเทาอมดำ ขึ้นอยู่กับแหล่งอาศัย มีขนาดความยาวประมาณ 5 - 6 เซนติเมตร โดยเปลือกหอยลายมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 97 (ตยาดี ตรงสถิตกุล, 2547, น. 54)

2) หอยแมลงภู่ มีชื่อสามัญว่า “หอยแมลงภู่” ชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า “Green Mussel” ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า “Perna viridis” เป็นหอยสองฝามีรูปร่างคล้ายเสียมที่งอนทางด้านหัวเล็กน้อย หอยที่อาศัยอยู่ในบริเวณใต้น้ำตลอดเวลาจะมีเปลือกสีเขียวอมดำ พวกที่อยู่ในบริเวณน้ำขึ้นและลงมีโอกาสถูกแสงแดดบ้างเปลือกจะมีสีเหลือง ซึ่งจะมีขนาดความยาวประมาณ 4 - 20 เซนติเมตร โดยเปลือกหอยแมลงภู่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 96 มีปริมาณใกล้เคียงกับฝู่นหินปูนที่มีปริมาณประมาณร้อยละ 98 (Ballester, Mármol, Morales & Sánchez, 2007) และจากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแมลงภู่พบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นทั้งในแบบอะราโกไนท์และแคลไซต์ (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545, น. 23)

3) หอยนางรม มีชื่อสามัญว่า “หอยนางรมหรือหอยตะโกรม” ชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า “Pacific Oyster” ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า “Crassostrea gigas” เป็นหอยสองฝาที่โดยทั่วไปฝาทั้งสองด้านมีขนาดไม่เท่ากัน ฝาข้างซ้ายจะมีขนาดใหญ่กว่า เปลือกของหอยนางรมจะเปลี่ยนไปตาม

สภาวะแวดล้อม หอยนางรมที่เติบโตบนวัตถุแข็ง เช่น หินหรือปูนซีเมนต์ เปลือกจะมีจำนวนร่องมาก แต่ถ้าเจริญเติบโตในน้ำที่มีความเค็มสูงเปลือกจะแข็งแรงกว่าหอยที่อยู่ในน้ำที่มีความเค็มต่ำ มีขนาดความยาวประมาณ 9 - 20 เซนติเมตร ซึ่งเปลือกหอยนางรมมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 96 และความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.35 - 2.47 โดยขึ้นอยู่กับขนาดของเปลือกหอยบด หากบดละเอียดมากความถ่วงจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม (Yoon, Kim & Han, 2003)

4) หอยแครง มีชื่อสามัญว่า “หอยแครง” ชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า “Cockle or Ark Shell” ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า “Anadara granosa” เป็นหอยสองฝาลักษณะค่อนข้างกลม เปลือกหนาส่วนใหญ่จะอาศัยอยู่ตามบริเวณชายฝั่งทะเลที่เป็นหาดโคลนและเลน หอยแครงเป็นหอยสองฝาชนิดหนึ่งที่มีลักษณะค่อนข้างกลมและแข็งแรง มีเปลือกหนา ด้านนอกของเปลือกทั้งสองข้างนั้นเป็นสันนูนในลักษณะเส้นโค้งจากด้านหลังไปยังปลายขอบของเปลือก มีจำนวนประมาณ 20 เส้น สีของเปลือกชั้นนอกไม่แน่นอน อาจจะมีสีขาวหรือแดงปนดำหรือแดงปนสีน้ำตาล โดยปกติแล้วเปลือกหอยจะเป็นสีขาวแต่จะถูกดินโคลนในแหล่งที่อยู่อาศัยจับจนเป็นสีน้ำตาล มีขนาดความยาวประมาณ 6 - 7 เซนติเมตร เปลือกหอยแครงมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 97 และจากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยแครง พบว่า มีโครงสร้างผลึกเป็นทั้งอะราโกไนท์และแคลไซต์ (จรรยาพร พุ่มงาม, 2545, น. 23)

## 2.2 คุณสมบัติทั่วไปและมาตรฐานควบคุมการผลิตของปูนฉาบ

### 2.2.1 คุณสมบัติทั่วไปของปูนฉาบ

คุณสมบัติโดยทั่วไปของปูนฉาบ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2544) ซึ่งแบ่งออกเป็น นิยามศัพท์ทั่วไป ส่วนประกอบของปูนฉาบ ปฏิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ คุณสมบัติและปฏิริยาของปูนฉาบ และคุณสมบัติที่ดีของปูนฉาบ ดังนี้

#### 1) นิยามศัพท์ทั่วไป มีดังนี้

- (1) ปูนซีเมนต์ (cement) หมายถึง สารที่ประสานยึดเกาะของแข็งหรือมวลรวม เช่น หิน กรวด ทราย ให้แข็งติดกัน
- (2) ซีเมนต์เพสต์ (cement paste) หมายถึง ส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับน้ำ
- (3) มอร์ตาร์ (mortar) หมายถึง ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์กับทราย (ปูนฉาบ)
- (4) คอนกรีต (concrete) หมายถึง ส่วนผสมของมอร์ตาร์กับหิน กรวด หรือทราย

## 2) ส่วนประกอบของปูนฉาบ มีดังนี้

(1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland cement) หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ได้จากการบดปูนเม็ด (clinker) ที่มีไฮดรอลิกคัลเซียมซิลิเกต (hydraulic calcium silicate) กับสารหน่วงการก่อตัวเป็นองค์ประกอบทางเคมี แบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

(1.1) ประเภทที่ 1 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา สำหรับใช้ทำคอนกรีตที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษกว่าธรรมดา

(1.2) ประเภทที่ 2 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง ที่สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตที่เกิดความร้อนและสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง

(1.3) ประเภทที่ 3 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว ที่สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานหรือถอดแบบเร็ว

(1.4) ประเภทที่ 4 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่ทำให้ความร้อนต่ำที่สุดกว่าปูนซีเมนต์ทุกประเภท

(1.5) ประเภทที่ 5 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ด้านทนซัลเฟตได้สูง

(2) มวลรวม (aggregate) หมายถึง วัสดุเฉื่อย ได้แก่ หิน ทราย กรวด ซึ่งเป็นส่วนผสมสำคัญของคอนกรีตเนื่องจากมวลรวมมีปริมาตรเป็นร้อยละ 70 - 80 ของปริมาณของส่วนผสมทั้งหมดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ โดยประเภทของมวลรวม ดังนี้

(2.1) แบ่งตามความหนาแน่นจะสามารถ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- มวลรวมเบา มีความหนาแน่นตั้งแต่  $300 - 1,100 \text{ kg/m}^3$
- มวลรวมปกติ มีความหนาแน่นตั้งแต่  $2,400 - 3,000 \text{ kg/m}^3$
- มวลรวมหนัก มีความหนาแน่นมากกว่า  $4,000 \text{ kg/m}^3$

(2.2) แบ่งตามขนาดสามารถ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

- มวลรวมหยาบ ได้แก่ หินหรือกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตร ขึ้นไป หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

- มวลรวมละเอียด ได้แก่ หินหรือกรวดที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร และสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

(3) น้ำ (water) หมายถึง น้ำที่สะอาดมีคุณภาพดีและมีปริมาณที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีต โดยมีหน้าที่ 3 ประการ ได้แก่

(3.1) ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

(3.2) ใช้บ่มคอนกรีตให้มีกำลังเพิ่มขึ้น

(3.3) ใช้ล้างมวลรวมที่สกปรก

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ โดยจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง โดยแบ่งออกตามปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท ดังนี้

(1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิเกตซึ่งเกิดจากสารประกอบหลัก 2 ตัว ได้แก่ ไตรซิลิเกต (3CaO.SiO<sub>2</sub> หรือ C<sub>3</sub>S) มีปริมาณประมาณร้อยละ 35 - 55 และไดซิลิเกต (2CaO.SiO<sub>2</sub> หรือ C<sub>2</sub>S) มีปริมาณประมาณร้อยละ 15 - 35 ซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำส่งผลให้เกิด Ca(OH)<sub>2</sub> และ CSH ทำหน้าที่เป็นตัวประสานและให้ความแข็งแรง

(2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิเกตอะลูมิเนียมซึ่งเกิดจากสารประกอบหลัก คือ ไตรซิลิเกตอะลูมิเนียม (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> หรือ C<sub>2</sub>A) โดยจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ทำให้ซีเมนต์เฟสแข็งแรงตัวอย่างรวดเร็ว จึงต้องใส่ยิบซั่มในขั้นตอนการบดซีเมนต์เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว โดยมีปริมาณประมาณร้อยละ 7 - 15

(3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระซิลิเกตอะลูมิเนียมเฟอไรต์ เกิดจากสารประกอบหลัก คือ เตตระซิลิเกตอะลูมิเนียมเฟอไรต์ (CaO.Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub> หรือ C<sub>4</sub>AF) โดย C<sub>4</sub>AF จะเกิดในช่วงต้นและทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)<sub>2</sub> และ CSH โดยมีปริมาณประมาณร้อยละ 5 - 10

## ตารางที่ 2.2

เวลาที่ให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จ ร้อยละ 80

| สารประกอบหลัก     | เวลา (วัน) |
|-------------------|------------|
| C <sub>3</sub> S  | 10         |
| C <sub>2</sub> S  | 100        |
| C <sub>2</sub> A  | 6          |
| C <sub>4</sub> AF | 50         |

ที่มา: ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2544, น. 16.

#### 4) คุณสมบัติและปฏิกิริยาของปูนฉาบ

(1) การก่อตัวและการแข็งตัว ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ จะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลว และสามารถขึ้นไหลได้ในเวลาหนึ่ง โดยจะเรียกช่วงเวลาที่คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า dormant period หลังจากนั้น ซีเมนต์เพสต์จะเริ่มจับตัว (stiff) ถึงแม้ว่าจะยังนิ่มอยู่ แต่ก็ไม่สามารถไหลตัวได้อีกแล้ว จุดนี้จะเป็นจุดที่เรียกกันว่า จุดแข็งตัวเริ่มต้น (initial set) และระยะเวลาตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดนี้ เรียกว่า เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่กลายเป็นของแข็งคงสภาพ (rigid solid) ซึ่งจะเรียกว่า จุดแข็งตัวสุดท้าย (final set) และเวลาที่ใช้จนถึงจุดดังกล่าว เรียกว่า เวลาการก่อตัวสุดท้าย (final setting time) ซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป จนกระทั่งสามารถรับน้ำหนักได้ กระบวนการทั้งหมดนี้ เรียกว่า การก่อตัวและการแข็งตัว

(2) ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลต่อปูนซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วด้วยเช่นกัน โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

(2.1) อายุของซีเมนต์เพสต์ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งปฏิกิริยาจะสิ้นสุดโดยสมบูรณ์

(2.2) องค์ประกอบของซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกเท่านั้นที่จะขึ้นอยู่กับสารประกอบหลักแต่ละสารโดยปูนซีเมนต์ที่มีไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) มากจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงปลายจะไม่แตกต่างกันนัก

(2.3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์ เมื่อความละเอียดของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกสูงขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงปลาย

(2.4) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในช่วงต้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ในช่วงหลังถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ส่งผลให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเฉลี่ยและดีกรีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย

(2.5) อุณหภูมิของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินั้นต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เพสต์

5) คุณสมบัติที่ดีของปูนฉาบ มีดังต่อไปนี้

- (1) มีความชื้นเหลวที่เหมาะสมสามารถทำงานฉาบ ได้อย่างสะดวกรวดเร็ว
- (2) สามารถอุ้มน้ำได้ดี เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุก่อคุดน้ำจากมอร์ตาร์มากเกินไป
- (3) สามารถยึดเกาะกับวัสดุก่อได้ดี และสามารถทนต่อการขัดถูของเกรียงเพื่อทำให้ผิวหน้าเรียบได้
- (4) ระยะเวลาการก่อตัวเหมาะสมกับแต่ละประเภทของงาน ไม่ช้าหรือเร็วเกินไป
- (5) มีปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม หากปริมาณอากาศน้อยเกินไปส่งผลให้ความสามารถในการทำงานลดลง ถ้ามากเกินไปจะทำให้กำลังลดลง
- (6) มีกำลังและความทนทาน ไม่ต่ำกว่าวัสดุที่นำมาก่อ
- (7) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น การขยายตัวและหดตัวมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุที่นำมาก่อ
- (8) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น ไม่ยืดหดตัวมากจนเกิดการแตกร้าวขึ้นในผนังปูนฉาบ
- (9) เมื่อแข็งตัวแล้วสามารถป้องกันอุณหภูมิและความชื้นได้ดี

## 2.2.2 มาตรฐานควบคุมและผลิตปูนฉาบ

มอร์ตาร์สำหรับฉาบ ซึ่งต่อไปในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอร์ตาร์สำหรับฉาบ มอก.1776-2542 สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมนี้จะเรียกว่า ปูนฉาบ หมายถึง ของผสมที่ได้จากการผสมวัสดุประสานและมวลผสมละเอียดเข้าด้วยกัน และอาจมีสารผสมเพิ่มหรือสีด้วยก็ได้เมื่อจะใช้งานต้องนำไปผสมน้ำให้ข้นเหลวตามต้องการ ใช้สำหรับฉาบผนังก่อหรือผิวคอนกรีตด้วยการฉาบชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ เพื่อให้ได้ความหนาตามที่กำหนด (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542) ประเภทและชนิดของปูนฉาบแบ่งการใช้งานกับพื้นผิวที่จะฉาบออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- 1) ประเภทฉาบผนังก่อ ที่ก่อด้วยอิฐก่อสร้างสามัญหรือคอนกรีตบล็อกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่
  - (1) ชนิดทั่วไป (MA-I) ใช้สำหรับงานฉาบผนังก่อที่ให้มีงานหยาบ
  - (2) ชนิดทั่วไป (MA-II) ใช้สำหรับงานฉาบผนังก่อที่ให้มีงานละเอียด
- 2) ประเภทฉาบผิวคอนกรีตคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ใช้สำหรับงานตกแต่งพื้นผิวคอนกรีต

คุณลักษณะของมวลรวมละเอียดที่ต้องการ มีดังนี้

- 1) ขนาดของทรายละเอียดหีบดละเอียด แนะนำให้เป็นไปตามตารางที่ 2.2 หรือผ่านร่อน 1.18 มิลลิเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 และผ่านร่อน 75 ไมโครเมตร ไม่มากกว่าร้อยละ 10

ตารางที่ 2.3

ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

| ขนาดร่อน         | ส่วนที่ผ่านร่อนร้อยละโดยน้ำหนัก |               |
|------------------|---------------------------------|---------------|
|                  | ส่วนหยาบ                        | ส่วนละเอียด   |
| 6.30 มิลลิเมตร   | 100                             | 100           |
| 4.75 มิลลิเมตร   | 95-100                          | 95-100        |
| 2.36 มิลลิเมตร   | 60-100                          | 80-100        |
| 1.18 มิลลิเมตร   | 30-100                          | 70-100        |
| 600.00 ไมโครเมตร | 15-80                           | 55-100        |
| 300.00 ไมโครเมตร | 5-50                            | 5-75          |
| 150.00 ไมโครเมตร | 0-15                            | 0-20          |
| 75.00 ไมโครเมตร  | ไม่มากกว่า 10                   | ไม่มากกว่า 10 |

ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542.

- 2) ปริมาณสารอินทรีย์ที่เจือปนของทรายและหินบดละเอียด เมื่อทดสอบปริมาณสารอินทรีย์ที่เจือปนในทรายและหินบดละเอียด ตามมาตรฐาน มอก. 566 แล้ว สีของสารละลายตัวอย่างต้องไม่เข้มกว่าสีของสารละลายมาตรฐานหรือกระจกสีมาตรฐานหมายเลข 3

- 3) ส่วนที่ละลายน้ำได้ของทราย เมื่อทดสอบตาม ASTM C 35 standard แล้ว ส่วนที่ละลายน้ำได้ ต้องไม่เกินร้อยละ 0.15

- 4) ความคงตัวของทราย เมื่อทดสอบตาม ASTM C 88 standard โดยแช่สารละลายและอบแห้ง 5 รอบ โดยเมื่อทดสอบกับโซเดียมซัลเฟต มวลที่หายไปต้องไม่เกินร้อยละ 20 หรือ เมื่อทดสอบกับแมกนีเซียมซัลเฟต มวลที่หายไปต้องไม่เกินร้อยละ 15

คุณลักษณะของปูนฉาบที่ต้องการ มีดังนี้

- 1) ลักษณะทั่วไป ปูนฉาบต้องเป็นผงและแห้ง ถ้าจับเป็นก้อนต้องสามารถใช้นิ้วมือบี้ให้แตกได้ง่าย การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ
- 2) ความต้านทานแรงอัด ความต้านทานแรงอัดของก้อนลูกบาศก์ตัวอย่างที่มีอายุ 28 วัน ขนาด 50 มิลลิเมตร 3 ก้อน เฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในตาราง การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 15 เล่ม 12 โดยผสมปูนฉาบให้มีค่าการไหลแผ่เบื้องต้น  $110 \pm 5$

#### ตารางที่ 2.4

เกณฑ์ความต้านทานแรงอัดของปูนฉาบ

| ประเภท        | เกณฑ์ที่กำหนด (เมกะพาสคัล) |
|---------------|----------------------------|
| ฉาบผนังก่อ    | 2.5                        |
| ฉาบผิวคอนกรีต | 5.0                        |

ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542.

- 3) ความอุ้มน้ำ (water retention) ความอุ้มน้ำของปูนฉาบต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 โดยกำหนดให้มีการแผ่ไหลเบื้องต้น  $110 \pm 5$  (ASTM C 91 standard)

- 4) ระยะเวลาก่อตัว การทดสอบระยะต้นของปูนฉาบ ต้องไม่น้อยกว่า 60 นาที (ASTM C 807 standard)

### 2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของปูนฉาบ

รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนผนังอาคารเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ โดยหนึ่งในสาเหตุของรอยแตกร้าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของปูนฉาบ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยค่าความเครียด (strain) เป็นค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงต่อความยาวเดิม ปูนฉาบเป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรภายในช่วงอายุ ความเครียดที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยที่เป็นผลจากสิ่งแวดล้อม เช่น สภาวะเปียกและแห้ง ความร้อน และความเย็น โดยการหดตัวของปูนฉาบที่แข็งตัวแล้วอาจทำให้เกิดการแตกร้าวของปูนฉาบได้หากหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นภายในปูนฉาบมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของปูนฉาบ ซึ่งปูนฉาบนับตั้งแต่เริ่มผสมเสร็จใหม่ ๆ ซึ่งอยู่ในสภาพเหลวจนกระทั่งสิ้นสุดอายุการใช้งานจะมีการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและมีการเคลื่อนที่เข้าหรือ

ออกของน้ำได้ (ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547, น. 209-211) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรของปูนฉาบสามารถจำแนกได้ ดังนี้

1) การหดตัวแบบพลาสติก (plastic shrinkage) คือ การหดตัวที่เกิดจากการเสียน้ำ ในขณะที่ปูนฉาบยังไม่แข็งตัว การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ปริมาตรลดลงและเกิดการหดตัว เนื่องจากปฏิกิริยาของซีเมนต์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นหลังการก่อตัวดังนั้นการหดตัวในช่วงนี้จึงเกิดขึ้นค่อนข้างสูง แต่ภายหลังจากการที่ซีเมนต์เฟสเริ่มแข็งตัวแล้วการหดตัวจะเกิดขึ้นได้ยากเพราะซีเมนต์เฟสเริ่มมีกำลังสูง โดยการหดตัวแบบพลาสติกสามารถทำให้เกิดรอยแตกร้าวบนปูนฉาบได้หากมีกระเหยออกของน้ำมากกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงโดยประมาณ (สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543, น. 11)

2) การหดตัวด้วยตัวเอง (autogenous shrinkage) คือ การหดตัวที่เกิดขึ้นในลักษณะที่มีการนำน้ำที่อยู่ในโพรงคาปิลารีมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในกรณีที่ไม่มีความชื้นหรือไม่ มีน้ำเข้าออกทำให้ซีเมนต์เฟสเกิดการหดตัว โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะยังคงมีต่อไป ภายหลังจากการก่อตัว เมื่อเปรียบเทียบกับ การหดตัวแบบแห้งแล้วการหดตัวด้วยตัวเองนี้หดตัวน้อยกว่ามาก

3) การหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) เป็นการหดตัวที่สำคัญที่สุด ที่เกิดจากการที่น้ำในปูนฉาบระเหยออกมา ทำให้ปูนฉาบเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวนั้นบางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แม้ว่าจะทำให้ปูนฉาบเปื่อยขึ้นขึ้นมาใหม่ การหดตัวแบบแห้งของปูนฉาบขึ้นอยู่กับ การหดตัวของซีเมนต์เฟส เพราะโดยทั่วไปมวลรวมมีการหดตัวต่ำมาก โดยทั่วไปปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง มีดังต่อไปนี้ ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของปูนฉาบ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณและชนิดของมวลรวม ชนิดและปริมาณวัสดุผสม อุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อม และมิติและรูปร่างของปูนฉาบ โดยวัสดุผสมที่มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น ถ่านลอยบางชนิดมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อยทำให้ชดเชยการหดตัวได้บางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้เนื่องจากช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้กับคอนกรีต และการใช้ฝุ่นหินปูนอาจสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้หากไม่เป็นการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ (สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543, น. 21) โดยนายหวังแก้ว บุญสวน (2542, น. 67-73) ได้นำหินฝุ่นมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของปูนก่อและปูนฉาบ พบว่า การผสมหินฝุ่นเพิ่มในมอร์ตาร์ส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งลดลงได้ เนื่องจากหินฝุ่นเป็นวัสดุค่อนข้างเฉื่อยและเป็นมวลรวมชนิดหนึ่ง และในงานวิจัยของ Benachour, Davy, Skoczylas

and Houari (2008) พบว่า เมื่อผสมหินฝุ่นในมอร์ตาร์ที่อัตราไม่เกินร้อยละ 35 ส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม

4) การขยายตัวหรือการบวม (expansion or swelling) ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือ คอนกรีต เมื่อบ่มในน้ำจะเกิดการขยายตัวและมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยซีเมนต์เพสต์เป็นต้นกำเนิดของการขยายตัวและมีการขยายตัวสูง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำถูกดูดเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดแรงต้านแรงยึดเกาะกันและทำให้เกิดแรงตึงผิวของอนุภาคซีเมนต์เจลลดลง จึงทำให้เกิดการขยายตัวขึ้น

## 2.4 ทัศนวิสัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องความร้อน

### 2.4.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน โดยธรรมชาติจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ วิธีการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 วิธีการหลัก ๆ คือ การนำความร้อน (thermal conduction) การพาความร้อน (thermal convection) และการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) (ตระการ ก้าวกลีกรรม, 2537, น. 5-7) ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางความร้อนของปูนฉาบซึ่งเป็นของแข็งและทึบแสง ดังนั้นวิธีการถ่ายเทความร้อนผ่านปูนฉาบที่สำคัญที่สุดจึงเป็นการถ่ายเทแบบนำความร้อน โดยการนำความร้อนเกิดจากการเคลื่อนที่ของพลังงานระหว่างโมเลกุลที่อยู่ติดกันโดยจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าไปสู่บริเวณที่เย็นกว่า หรือมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลมากกว่าหรือมีการเคลื่อนไหวน้อยของโมเลกุลช้ากว่าโดยจะมีการถ่ายเทความร้อนในทุกทิศทางและจะมีการนำความร้อนมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล โดยที่วัสดุที่มีความหนาแน่นมากจะมีการส่งผ่านความร้อนได้ดี ตัวแปรที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพทางความร้อนของวัสดุ มีดังนี้

1) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน (heat conductivity:  $k$ ) เป็นค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิด มีหน่วยเป็น  $W/m \cdot K$

2) ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสสารในช่วงเวลา ความหนาพื้นที่ และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะใช้ในการวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุความนำความร้อน (conductance:  $C$ ) มีหน่วยเป็น  $W/m^2 \cdot K$  ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านสสารในความหนาที่กำหนดในช่วงเวลา 1 หน่วย โดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 1 หน่วย โดย  $C = k/\text{ความหนาวัสดุ}$

3) ความต้านทานความร้อน (resistance:  $R$ , R-value) มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$  เป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดค่าการเป็นฉนวนกันความร้อนภายในอาคาร โดยค่า R-value ยิ่งมากแสดงถึงความเป็นฉนวนที่ดีมาก โดย  $R = 1/C$

4) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient:  $U$ ) โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีค่าเท่ากับ  $1/\Sigma R$  มีหน่วยเป็น  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  ถ้าหากวัสดุผนังมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมาก หมายถึง มีค่าความต้านทานความร้อนรวมของวัสดุผนังน้อย ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนเข้ามาสู่ภายในตัวอาคารได้มากกว่าวัสดุผนังที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า

#### 2.4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการส่งผ่านความร้อนของปูนฉาบ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการส่งผ่านความร้อนของปูนฉาบนั้นมีหลากหลายประการ จึงพิจารณาปัจจัยบางประการที่มีความสำคัญ ดังนี้

1) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นโดยลดปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้การนำความร้อนของคอนกรีตต่ำลง โดยส่งผลต่อมอร์ตาร์และซีเมนต์เพสต์มากกว่าคอนกรีต ผลการทดสอบอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น ที่อัตราส่วนร้อยละ 25 30 35 และ 40 ตามลำดับ โดยที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส พบว่า ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์สภาวะแห้งมีค่าลดลง ดังนี้ 0.84 0.83 0.74 และ 0.66 ( $\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ) ตามลำดับ (Kim, Jeon & Yang, 2003)

2) ชนิดของมวลรวมที่ในมอร์ตาร์ เช่น การใช้ทรายสองชนิดเป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์ พบว่า มอร์ตาร์ผสมด้วยทรายชนิดที่ 1 และทรายชนิดที่ 2 มีค่าการนำความร้อนที่ 1.90 และ 1.37 ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ) ตามลำดับ (Khan, 2002) โดยเนื่องจากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า ทรายชนิดที่ 2 มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าทรายชนิดที่ 1

3) ความพรุนของปูนฉาบ โดยปูนฉาบที่มีความพรุนสูง จะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าปูนฉาบที่มีความพรุนที่ต่ำเพราะช่องอากาศมากกว่า โดยค่าการนำความร้อนของอากาศประมาณ  $0.024 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปูนฉาบมาก หากช่องอากาศในปูนฉาบมากกว่าจะส่งผลทำให้ค่าการนำความร้อนรวมของปูนฉาบลดลง โดยในการศึกษาของ Bouguerra, Ledhem, Barquin, Dheilly and Que'neudec (1998) พบว่า เมื่อผสมมวลรวมประเภทไม้แทนที่ดินเหนียวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับค่าการนำความร้อนของคอนกรีตที่ลดลง

4) ความชื้นของปูนฉาบ โดยปูนฉาบที่มีความชื้นสูงจะมีค่าการนำความร้อนมากกว่าปูนฉาบที่แห้ง เพราะว่าน้ำที่อยู่ในช่องว่างของปูนฉาบนั้น ส่งผลทำให้การนำความร้อนโดยรวมของปูนฉาบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าการนำความร้อนของน้ำประมาณ  $0.602 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ซึ่งสูงกว่าค่าการนำความร้อนของอากาศประมาณ  $0.024 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (ASHRAE, 2005, pp. 39.1-39.2) หากช่องว่างในปูนฉาบเต็มไปด้วยน้ำจึงส่งผลทำให้ค่าการนำความร้อนรวมของปูนฉาบเพิ่มขึ้น

## 2.5 งานวิจัยอื่น ๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง

### 2.5.1 การใช้เปลือกหอยบดเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีต

การศึกษาโดยนำเปลือกหอยขมบด (periwinkle shell) บางส่วนหรือทั้งหมดเป็นส่วนผสมของมวลรวมในคอนกรีต โดยกำหนดส่วนผสมมาตรฐานของปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหิน และเปลือกหอยขมบดออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้  $1:1\frac{1}{2}:3$   $1:2:4$  และ  $1:3:6$  และสำหรับการทดแทนหินด้วยเปลือกหอยขมมีการกำหนดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อเปลือกหอยขม ดังนี้  $1:3\frac{1}{2}:1$  และ  $1:4\frac{1}{2}:1\frac{1}{2}$  ปริมาณของเปลือกหอยขมที่ใช้จะมีการเพิ่มอัตราการแทนที่หินในปริมาณร้อยละ 10 ของส่วนผสมมาตรฐาน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ความสามารถในการทำงานได้ และความหนาแน่นของตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนการแทนที่ของเปลือกหอยขม โดยผลการทดสอบว่า กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงต่ำลง เมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่หินของเปลือกหอยขมในส่วนผสมมาตรฐาน ส่วนกำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เปลือกหอยขมแทนที่หินทั้งหมด ที่อายุ 28 วัน ของส่วนผสม  $1:3\frac{1}{2}:1$  และ  $1:4\frac{1}{2}:1\frac{1}{2}$  เท่ากับ  $15.65$  และ  $11.77 \text{ N/mm}^2$  ตามลำดับ และหน่วยน้ำหนัก เท่ากับ  $2,100$  และ  $1,850 \text{ kg/m}^3$  ตามลำดับ ความหนาแน่นของเปลือกหอยขม มีค่าเท่ากับ  $694.44 \text{ kg/m}^3$  บ่งบอกว่าเปลือกหอยขมเป็นมวลรวมเบา และความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณเปลือกหอยในส่วนผสมเพิ่มขึ้น (Falade, 1995)

การศึกษาเพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำเปลือกหอยนางรมมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง โดยได้ศึกษาลักษณะทางเคมีและทางกลของเปลือกหอยนางรมบด ในการทดสอบวิเคราะห์ทางเคมีและโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่า เปลือกหอยนางรมบดมีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต รวมทั้งยังมีสารอินทรีย์เล็กน้อย การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ ด้วยอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ น้ำ ทรายและเปลือกหอยนางรมบดในอัตราส่วน

ต่าง ๆ กัน โดยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ได้ผลว่า ในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:5 และ 1:10 เมื่ออัตราส่วนการใช้เปลือกหอยนางรมทดแทนที่ทรายที่มากกว่าร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ดลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อผสมเปลือกหอยนางรมทดแทนที่ปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 40 ของการแทนที่ทราย พบว่า ไม่มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญในกำลังรับแรงอัด บ่งบอกถึงความสามารถของการนำกลับมาใช้ใหม่ในวัสดุก่อสร้างได้ (Yoon et al., 2003) การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเปลือกหอยนางรมทดแทนมวลรวมในมอร์ตาร์ โดยการประเมินของผลอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ น้ำ และเปลือกหอยนางรมทดแทน ในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด โดยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่ผสมกับทราย รวมทั้งผลกระทบของสารผสมเพิ่มในคอนกรีตที่แข็งตัวซึ่งทำการประเมินด้วยมอร์ตาร์ผสม ethyl-benzene และการปรับปรุงความแข็งแรงในระยะยาวโดยการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพิ่ม จากผลการทดสอบพบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปผลึกของแคลไซต์เป็นส่วนประกอบหลักของเปลือกหอยนางรม มีลักษณะรูปร่างแบนและกลม และมีน้ำหนักเบากว่าทรายเพราะว่าความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.38 - 2.41 และไม่มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเปลือกหอยนางรมขนาดเล็กที่ใช้แทนที่ทราย (Yoon, Park & Lee, 2004) และการศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัวโดยมีตัวแปรได้แก่ ค่าโมดูลัสความละเอียด และอัตราการแทนที่ทรายด้วยเปลือกหอยนางรมทดแทน ผลการทดสอบพบว่าไม่มีปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยนางรมทดแทนกับซีเมนต์เฟสท์เกิดขึ้น ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงเมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดลดลงและอัตราการแทนที่ทรายด้วยเปลือกหอยนางรมทดแทนเพิ่มขึ้น รวมทั้งยังพบว่าการผสมเปลือกหอยนางรมทดแทนไม่ได้เป็นสาเหตุของการลดลงของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และการพัฒนากำลังอัดเร็วขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่ทรายด้วยเปลือกหอยนางรมทดแทนเพิ่มขึ้น และสัมพันธ์กับความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง เมื่ออัตราการแทนที่ของเปลือกหอยนางรมทดแทนเพิ่มขึ้น โดยลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่ออัตราการแทนที่เท่ากับร้อยละ 20 (Yang, Yi & Leem, 2005)

การศึกษาโดยนำของเสียจากหอยแมลงภู่มานำมาผลิตอิฐมวลเบาจากอุตสาหกรรมหอยแมลงภู่นิวซีแลนด์ ทั้งส่วนที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยในส่วนของเปลือกหอยแมลงภู่มที่เป็นสารอนินทรีย์นั้นได้นำไปทดสอบโดยใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีต และได้ทดสอบในเรื่องของกำลังรับแรงอัด และการนำความร้อนของคอนกรีตผสมเปลือกหอยแมลงภู่มบด ผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เปลือกหอยแมลงภู่มบดทดแทนหินนั้น ไม่มีประสิทธิภาพทางด้านโครงสร้าง และไม่ผ่านมาตรฐาน NZS 3108-1983 ของประเทศนิวซีแลนด์ อย่างไรก็ตามการทดสอบด้าน

ประสิทธิภาพของการนำความร้อน พบว่า คอนกรีตผสมเปลือกหอยแมลงภู่มวดอาจจะสามารถนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้ เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตตามมาตรฐาน NZS 3108-1983 (Barnaby, 2004) และในการศึกษาโดยการนำเปลือกหอยแมลงภู่มวดที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมหอยกระป๋องเป็นส่วนผสมในการผลิตมอร์ตาร์ โดยการใช้เปลือกหอยแมลงภู่มวดมาทดแทนในส่วนของผู้หยาบปูนที่ได้มาจากเหมืองหิน โดยใช้ทดแทนในอัตราส่วนร้อยละ 0 4 8 และ 12 โดยส่วนของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย คือ 1:7.8 จากผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเปลือกหอยแมลงภู่มวดร้อยละ 12 ที่อายุการบ่ม 90 วัน มีกำลังอัดและกำลังดึงสูงที่สุด และในด้านของความพรุนของมอร์ตาร์ พบว่าลักษณะของรูพรุนเล็ก ๆ ในมอร์ตาร์ที่เกิดจากเปลือกหอยแมลงภู่มวดนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าผู้หยาบปูนจากเหมืองหินในการเพิ่มความแข็งแรงของมอร์ตาร์ และในลักษณะโครงสร้างและขนาดของอนุภาคเปลือกหอยแมลงภู่มวดนั้นส่งเสริมให้เกิดการก่อตัวของโครงสร้างแบบตาข่ายจำนวนมากในช่วงระยะเวลาของการบ่มตัวของมอร์ตาร์ (Ballester et al., 2007)

สรุปผลการศึกษา พบว่า เมื่อใช้ปริมาณเปลือกหอยบดทดแทนมวลรวมชนิดอื่นในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กำลังอัดของคอนกรีตและมอร์ตาร์จะอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และเปลือกหอยบดเหมาะสมสำหรับการนำไปแทนที่ทราย (มวลรวมละเอียด) มากกว่าการแทนที่หิน (มวลรวมหยาบ) เพราะว่าลักษณะรูปร่างแบนเรียบ ความพรุนสูง และความแข็งแรงต่ำกว่าหิน เมื่อผสมทดแทนหินลงไปแล้วจะทำให้กำลังอัดตกลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

## 2.5.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของคอนกรีต มอร์ตาร์ และซีเมนต์เพสต์ 7 ประการ ได้แก่ อายุบ่ม อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ชนิดของสารผสมเพิ่ม อัตราส่วนของวัสดุมวลรวม ลักษณะของมวลรวมละเอียด อุณหภูมิ และความชื้น ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของคอนกรีต คือ อัตราส่วนของวัสดุมวลรวมและความชื้น ส่วนปัจจัยสำคัญส่งผลต่อมอร์ตาร์และซีเมนต์เพสต์ คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และชนิดของสารผสมเพิ่ม โดยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ ร้อยละ 25 30 35 และ 40 ตามลำดับ ทำให้ค่าการส่งผ่านความร้อนของซีเมนต์เพสต์ลดลง ดังนี้ 0.84 0.83 0.74 และ 0.66 (kcal/m·h·°C) ตามลำดับ โดยที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และในสภาวะซีเมนต์เพสต์แห้งมีค่าการส่งผ่านความร้อน 0.82 0.82 0.73 และ 0.65 (kcal/m·h·°C) ตามลำดับ โดยการควบคุมอุณหภูมิที่ 40

องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของวัสดุมวลรวมต่อปริมาณปูนซีเมนต์ คือ 0.70 0.63 0.56 0.49 0.35 0.21 และ 0 ตามลำดับ ทำให้ซีเมนต์เพสต์สถานะแห้งมีค่าการส่งผ่านความร้อน 1.69 1.67 1.52 1.32 1.10 0.86 และ 0.66 ( $\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) ตามลำดับ โดยที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และสถานะซีเมนต์เพสต์แห้งมีค่าการส่งผ่านความร้อน 1.67 1.62 1.45 1.27 1.09 0.83 และ 0.65 ( $\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) ตามลำดับ โดยการควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส (Kim, Jeon & Yang, 2003)

ในการศึกษาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยของไมโครซิลิกา แก้วลอย class c และตะกรันเหล็ก ต่อค่าการนำความร้อนของคอนกรีต พบว่า เมื่อผสมวัสดุผงทดแทนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลง โดยคอนกรีตผสมไมโครซิลิกาในปริมาณมากขึ้นร้อยละ 0 7.5 และ 15 ทำให้ค่าการส่งผ่านความร้อนลดลง ดังนี้ 1.230 1.167 และ 1.057 ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) ตามลำดับ โดยคอนกรีตผสมแก้วลอย class c ในปริมาณที่มากขึ้นที่ร้อยละ 0 15 และ 30 มีค่าการส่งผ่านความร้อนลดลง ดังนี้ 1.230 1.083 และ 0.9518 ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) ตามลำดับ โดยคอนกรีตผสมตะกรันเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นที่ร้อยละ 0 15 และ 30 มีค่าการส่งผ่านความร้อนลดลง ดังนี้ 1.230 1.099 และ 1.044 ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) ตามลำดับ (Demirboga, 2007)

การศึกษามวลกระทบต่อค่าการนำความร้อนของวัสดุมวลรวม คีซามอร์ตาร์ คอนกรีตผสมหินภูเขาไฟ คอนกรีตผสมหินปูน คอนกรีตผสมหินทรายแป้ง และคอนกรีตผสมหินควอร์ตไซต์ ซึ่งมีอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อวัสดุมวลรวมละเอียดต่อวัสดุมวลรวมหยาบเป็น 1 : 2.33 : 4.66 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 และทรายที่ใช้จะแบ่งเป็น 2 ชนิด ซึ่งค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ คอนกรีตผสมหินภูเขาไฟ คอนกรีตผสมหินปูน คอนกรีตผสมหินทรายแป้ง และคอนกรีตผสมหินควอร์ตไซต์ ที่ผสมทรายชนิดที่ 1 จะมีค่า 1.90 2.26 2.03 2.21 และ 2.77 ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) ตามลำดับ โดยจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าของมอร์ตาร์ คอนกรีตผสมหินภูเขาไฟ คอนกรีตผสมหินปูน คอนกรีตผสมหินทรายแป้ง และคอนกรีตผสมหินควอร์ตไซต์ ที่ผสมทรายชนิดที่ 2 จะมีค่า 1.37 1.97 1.60 1.91 และ 2.29 ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) ตามลำดับ เนื่องจากค่าการส่งผ่านความร้อนของวัสดุมวลรวมที่ผสมซึ่งก็คือ ทรายชนิดที่ 1 จะมีค่าการส่งผ่านความร้อนที่สูงกว่าทรายชนิดที่ 2 เช่นเดียวกันกับค่าการส่งผ่านความร้อนของคอนกรีตที่ผสมวัสดุมวลรวมหยาบที่ต่างชนิดกันก็จะมีค่าการนำความร้อนที่ไม่เท่ากัน ซึ่ง หินภูเขาไฟ หินปูน หินทรายแป้ง และหินควอร์ตไซต์ มีค่าการส่งผ่านความร้อน 4.03 3.15 3.52 และ 8.58 ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) ตามลำดับ ส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมหินควอร์ตไซต์มีค่าการส่งผ่านความร้อนสูงสุด และคอนกรีตที่ผสมหินปูนมีค่าการส่งผ่านความร้อนน้อยที่สุด (Khan, 2002)