

บทที่ 2

วรรณคดีวิจารณ์

2.1 คำนำ

ปูนฉาบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป คือ ปอร์ตแลนด์-โกล์มอร์ต้า ประกอบด้วยส่วนผสม หรือ ตัวแปรหลักคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ปูนขาว, ทราย, และน้ำ ต่อมาได้มีการพยายามพัฒนาคุณภาพ ปูนฉาบขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อให้ปูนฉาบเหมาะสมกับสภาพการใช้งานและมีความเหมาะสม กับวัสดุโครงสร้างหลัก โดยมีการใส่สารผสมเพิ่มหรือวัสดุอื่นๆ เป็นตัวแปรรองเพื่อปรับปรุง คุณสมบัติที่ต้องการ แล้วทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เช่น กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึง, การหดตัว ฯลฯ

การศึกษาปรับปรุงคุณภาพปูนฉาบที่ผ่านมา มักจะเป็นการศึกษาโดยพิจารณาผลของตัวแปรแต่ละชนิดต่อคุณสมบัติต่างๆของปูนฉาบ เช่น สายัณห์ ผลิตรกรรม(2533) ได้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของปูนฉาบที่ผสมสารกระจายกักฟองอากาศเปรียบเทียบกับปูนฉาบที่ผสมปูนขาว วสันต์ วีระเจตกุล(2532) ได้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของซีเมนต์โกล์มอร์ต้า เป็นต้น

2.2 คุณสมบัติของมอร์ต้าที่ใช้ในงานฉาบ

มอร์ต้าที่เหมาะสมสำหรับงานฉาบผนังอิฐก่อหรือวัสดุหลักที่ติดนั้น ต้องประกอบด้วย คุณสมบัติดังต่อไปนี้(5)

2.2.1 สามารถรับแรงอัด แรงเฉือน และแรงดึงไม่ต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับกำลังของอิฐหรือ วัสดุโครงสร้างหลัก

2.2.2 การหดตัวหรือการขยายตัวของปูนฉาบต้องใกล้เคียงกับตัวอิฐหรือวัสดุโครงสร้างหลัก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

2.2.3 มีแรงยึดเหนี่ยวที่ดี สามารถยึดเกาะกับอิฐหรือวัสดุโครงสร้างหลักได้ดี

2.2.4 มีแรงยึดเกาะที่ดีขณะที่ยังเปียกอยู่ และสามารถทนทานต่อการขัดถูของเกรียงเป็น เวลานานเพื่อให้ผิวเรียบขณะฉาบ

2.2.5 เมื่อแข็งตัวแล้วต้องไม่หดตัวมากเกินไป จนเกิดการแตกร้าวขึ้นในปูนฉาบ

2.2.6 เมื่อแข็งตัวแล้วต้องมีเนื้อแน่นพอที่จะ ไม่น้ำซึมผ่านเข้าออกได้ ซึ่งจะทำให้เกิด การแตกร้าวเสียหาย

2.2.7 สำหรับผนังปูนฉาบภายนอกที่อยู่กับแดดและฝน ต้องแข็งแรงและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพดินฟ้าอากาศและอุณหภูมิ จนไม่เกิดการแตกร้าวเกิดความเสียหาย

นอกจากนี้มอร์ต้าสำหรับงานฉาบที่ได้ต้องสามารถทำงานง่าย(Workability) เหนียวลื่น นุ่มมือเนื้อสม่ำเสมอและมีความข้นเหลวพอเหมาะที่จะใช้เกรียงธรรมดาปาดให้เรียบได้ง่าย

ประณต กุลประสูตร(2536) ได้แนะนำว่ามอร์ต้าสำหรับปูนฉาบที่ฉี้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติยึดติดกับพื้นหรือผนังที่ฉาบได้เป็นอย่างดี และเนื่องจากเป็นส่วนที่จะต้องทำให้เกิดความสวยงาม จึงต้องมีคุณสมบัติอื่นๆอีกด้วย เช่น ต้องสามารถทนทานต่อการถูไถของเกรียงได้นานพอที่จะทำให้ผิวเรียบ และไม่แตกร้าวเมื่อแข็งตัวอีกทั้งทนต่อการขีดขูดด้วยมืออุณหภูมิ และความชื้นเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1-2:3-6

โดย	ปูนซีเมนต์	1	ส่วน
	ปูนขาว	1-2	ส่วน (ขึ้นกับประเภทของงาน)
	ทรายละเอียด	3-6	ส่วน (ขึ้นกับประเภทของงาน)

มาตรฐาน ASTM C 270 ได้แนะนำการเลือกใช้มอร์ต้าแต่ละประเภทโดยใช้ส่วนผสมของปูนซีเมนต์:ปูนขาว:ทราย ให้เหมาะสมกับประเภทของงานดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

2.3 คอนกรีตเบา

คอนกรีตเบา(Lightweight Concrete)คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยวัตถุประสงค์ในการใช้งานทางโครงสร้างที่สำคัญคือ ช่วยลดน้ำหนักของอาคาร คอนกรีตเบาแบ่งตามวัสดุที่ใช้ได้เป็น 3 ชนิด คือ(23)

2.3.1 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา(Lightweight Aggregate Concrete) โดยมวลรวมเบาที่ใช้จะมีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 60-1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เช่น หิน Vermiculite, Perlite, Pumice หรือมวลรวมเบาที่ได้จากขบวนการผลิต ซึ่งจะได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักประมาณ 300-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ 4-480 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การนำความร้อนต่ำ การดูดซึมน้ำสูง

2.3.2 โฟมคอนกรีต(Aerated or Foam Concrete) คอนกรีตชนิดนี้ได้จากการผสมฟองอากาศขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.10-1.00 มิลลิเมตร หรือที่เรียกว่า โฟม ลงในคอนกรีต อาจผสมสารทำให้เกิดโฟม(Foaming Agent) ลงในส่วนผสมหรือทำให้เกิดโฟมก่อนแล้วผสมกับมอร์ต้า นอกจากนั้นยังสามารถทำให้เกิด Aerated Concrete ได้โดยทำให้คอนกรีตเกิดฟองอากาศเล็กๆจำนวนมากโดยใช้สารเคมีคือ ผงอะลูมิเนียม(Aluminium Powder) ลงไปซึ่ง จะทำปฏิกิริยากับ

Ca(OH)_2 ก่อให้เกิดฟองของไฮโดรเจน คอนกรีตชนิดนี้จะมีกำลังอัดสูงขึ้นถ้าทำการบ่มโดยวิธีไฮดรอน้ำที่มีความดันสูง(Autoclaving)

2.3.3 คอนกรีตที่ไม่มีส่วนละเอียด(No-Fines Concrete) คอนกรีตชนิดนี้ได้จากการไม่ใส่ทรายลงในส่วนผสมจะมีหินเพียงอย่างเดียว คอนกรีตชนิดนี้จึงมีโพรงและช่องว่างมาก ทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำ

Autoclaved Aerated Concrete

Autoclaved Aerated Concrete(AAC) เป็นคอนกรีตเบาชนิดโฟมคอนกรีตและทำการบ่มโดยวิธีไฮดรอน้ำที่มีความดันสูงมีวิธีการผลิตดังรูปที่ 2.1 โดยมีวัตถุดิบที่สำคัญๆ คือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ทราย น้ำ และสารที่ทำให้เกิดโฟม(Foaming Agent) AAC มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานด้วยเหตุผลหลายประการ คือ มีน้ำหนักเบาประมาณ 500-650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถรับแรงอัดได้ 25-70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กันความร้อนและกันเสียงได้ดี มีขนาดมาตรฐานเพราะผลิตโดยตรงจากโรงงานและก่อสร้างได้ง่าย สามารถใช้เลื่อยตัดหรือใช้ตะปูตอกเหมือนงานไม้ทั่วไปได้ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงนิยมใช้ AAC ในงานเป็นกำแพงหรือผนังเป็นส่วนใหญ่

คุณสมบัติของ AAC (11)

กำลังรับแรงอัด(Compressive Strength) รูปที่ 2.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต AAC ที่มีความหนาแน่นเมื่อแห้ง(Dry Density) ระหว่าง 300-800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งกำลังรับแรงอัดของ AAC จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดสอบ เช่น ขนาดของแท่งทดสอบ ความชื้นของแท่งทดสอบ เป็นต้น สำหรับกำลังรับแรงดึง(Tensile Strength) มีค่าประมาณ 1 ใน 4 ถึง 1 ใน 6 ของกำลังรับแรงอัด

โมดูลัสยืดหยุ่น(Modulus of Elasticity) จะขึ้นอยู่กับค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นตามสมการ

$$E_c = k \gamma_{dry} \sqrt{f_c}$$

$$E_c = \text{เทนเจนท์โมดูลัส (เมกะปาสคาล)}$$

$$\gamma_{dry} = \text{ความหนาแน่นเมื่อแห้ง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)}$$

$$f_c = \text{ค่ากำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)}$$

$$k = \text{ค่าสัมประสิทธิ์ 1.50 - 2.00}$$

โดยสมการนี้ใช้ได้กรณีที่ AAC มีความหนาแน่นประมาณ 400-700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความชื้น 3-10 % โดยปริมาตร

การขยายตัวตามอุณหภูมิ(Thermal Expansion) สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิของ AAC มีค่าประมาณ $8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตและเหล็ก ทำให้ AAC กันความร้อน และเป็นฉนวนได้เป็นอย่างดี รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการหดตัวของ AAC กับ ปริมาณความชื้น

2.4 วัสดุหลักที่ใช้ในงานฉาบปูน

2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักที่ใช้ก่อร่าง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย คัลเซียมไฮดรอกไซด์(CaO), ซิลิกา(SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3) และออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นหลัก ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 2.3 ปูนซีเมนต์เมื่อผสมน้ำจะได้ซีเมนต์เพสต์ ซึ่งคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ซีเมนต์เมื่อผสมน้ำใหม่ ๆ จะมีสภาพเหลวข้นได้ เมื่อแข็งตัวแล้วจะสามารถรับน้ำหนักได้ และมีการยึดหดตัวค่อนข้างสูงทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย จะต้องมีการผสมวัสดุเฉื่อยหรือมวลรวมละเอียดเข้าไปเพื่อลดการแตกร้าว เมื่อนำมาใช้ในงานฉาบปูน(6)

2.4.2 มวลรวม

มวลรวม(Aggregate) คือ วัสดุเฉื่อย อันได้แก่ หิน ทราย กรวด ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมีมวลรวมในส่วนผสมถึง 70-80 % ดังนั้นมวลรวมจึงมีผลมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ต้า และอีกอย่างหนึ่งมวลรวมเป็นส่วนผสมที่มีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมคอนกรีตหรือมอร์ต้าจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อจะทำให้ปริมาณปูนลดลง และยังช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนและปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก(23)

มวลรวมที่ใช้ในงานปูน-งานคอนกรีต แบ่งตามขนาดได้ 2 ประเภท คือ

2.2.2.1 มวลรวมหยาบ(Coarse Aggregate) ได้แก่ หิน หรือ กรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

2.2.2.2 มวลรวมละเอียด(Fine Aggregate) ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

ทราย(Sand)

ทรายที่ใช้ในงานฉาบปูน ควรเป็นทรายน้ำจืด และต้องเป็นทรายที่สะอาด, ไม่มีดิน, เศษวัชพืชหรือสิ่งอื่นใดเจือปน เนื่องจากทรายที่มีสิ่งสกปรกเจือปนจะทำให้ปูนฉาบมีคุณภาพต่ำ

และทรายที่ใช้ควรเป็นทรายที่มีขนาดละเอียดดี(Well Grade) มาตรฐาน ASTM C 144 ได้กำหนดขนาดละเอียดของทรายสำหรับมอร์ต้าไว้ตามตารางที่ 2.4

2.4.3 น้ำ

น้ำ(Water)เป็นสิ่งสำคัญในส่วนผสมของปูนฉาบ เพราะนอกจากทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แล้ว ยังทำให้ปูนฉาบมีความเหลวลื่น ทำงานง่าย แต่ปริมาณน้ำที่ใช้ควรพอเหมาะ เพราะถ้าใส่เข้าไปมากเกินไปไม่เพียงแต่จะทำให้กำลังของมอร์ต้าลดลง ยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวอันเกิดจากการระเหยของน้ำ แต่ถ้าใส่น้ำในปริมาณน้อยก็ทำให้ยากต่อการทำงาน ปริมาณน้ำที่เหมาะสมสังเกต

จากส่วนผสมที่ได้จะมีความนุ่ม เหลว ลื่น ทำงานง่าย ถ้าส่วนผสมอ่อนหรือไหลได้แสดงว่าน้ำมากเกินไป และถ้าปาดด้วยเกรียงแล้วไม่บีบแบนง่าย ๆ ก็แสดงว่าปริมาณน้ำน้อยเกินไป

นอกจากนั้นน้ำที่ใช้ผสมควรเป็นน้ำที่สะอาดใช้ดื่มได้ ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

2.4.4 ปูนขาว

ปูนขาว(Lime) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สำคัญอีกประเภทหนึ่ง นิยมใช้ทั่วไปในงานก่ออิฐหรืองานฉาบปูน ปูนขาวผลิตจากแคลไซต์หรือปูนคัลเซียม(Calcium Limestone) หรือหินปูนแมกเนเซียม (Magnesium Limestone) หินปูนคัลเซียมจะประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นหลัก ส่วนหินปูนแมกเนเซียมจะมีส่วนประกอบทั้งแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกเนเซียมคาร์บอเนต เมื่อเผาแคลเซียมคาร์บอเนตจะสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์(CaO) และคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ $900-1,000^{\circ}\text{C}$ ($1,650-1,830^{\circ}\text{F}$) แคลเซียมออกไซด์เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ควิกไลม์(Quick Lime) เมื่อพ่นน้ำใส่ในสัดส่วนที่พอเหมาะจะเกิดการแตกตัวเหมือนกับการถูกบด กลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์(Ca(OH)_2) หรือไฮเดรตไลม์ (Hydrated Lime) ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด

ตามมาตรฐาน ASTM C 207 ได้แบ่งประเภทปูนขาวเป็น 4 ประเภท ดังตาราง 2.6 คือ

ประเภท N. -ไฮเดรตไลม์แบบธรรมดาเพื่อใช้สำหรับงานก่อและฉาบ(Normal hydrated lime for masonry purposes)

ประเภท S. -ไฮเดรตไลม์ชนิดพิเศษเพื่อใช้สำหรับงานก่อและฉาบ(Special hydrated lime for masonry purposes)

ประเภท NA. -ไฮเดรตไลม์แบบธรรมดาผสมสารกระจายกักฟองอากาศเพื่อใช้สำหรับงานก่อและฉาบ(Normal air-entraining hydrated lime for masonry purposes)

ประเภท SA. -ไฮเดรตไลม์ชนิดพิเศษผสมสารกระจายกักฟองอากาศเพื่อใช้
สำหรับงานก่อและฉาบ(Special air-entraining hydrated lime for masonry purposes)

2.4.5 สารผสมเพิ่มคอนกรีต

สารผสมเพิ่ม(Concrete Admixture)หรือน้ำยาผสมคอนกรีต หมายถึง สารใดๆนอกเหนือ
จาก ปูนซีเมนต์ น้ำ หินและทราย ที่เติมในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าก่อนการผสมหรือขณะที่
ผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตขณะที่ยังเหลวอยู่หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว
เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของวัสดุ, สิ่งแวดล้อม
และสภาพการทำงาน วัตถุประสงค์ทั่วไปของการใช้น้ำยาผสมคอนกรีตคือปรับปรุงความ
สามารถเทได้, เร่งหรือหน่วงระยะเวลาในการก่อตัว, ควบคุมหรือดัดแปลงพัฒนาการกำลังอัด
ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน การทนต่อการกัดและซัลเฟต
 เป็นต้น

สารผสมเพิ่มที่ผลิตออกมาจำหน่ายโดยทั่วไป แบ่งเป็น 4 กลุ่ม ใหญ่ๆ(1) คือ

2.2.5.1 สารกระจายกักฟองอากาศ(Air-Entraining Agent) ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการ
ทำงานของคอนกรีตในขณะที่อยู่ในสภาพเหลว

2.2.5.2 สารเคมีผสมคอนกรีต(Chemical Admixture) เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำ ที่เติม
ลงในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น ลดปริมาณน้ำในส่วนผสม
เพื่อเพิ่มกำลังอัด เป็นต้น

2.2.5.3 สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม(Mineral Admixture) มีลักษณะเป็นผงละเอียด ใช้
ปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานของคอนกรีต เพิ่มความคงทนของคอนกรีต

2.2.5.4 สารผสมเพิ่มอื่นๆ ได้แก่ สารผสมเพิ่มอื่นๆ ที่นอกเหนือจาก 3 ประเภทแรก

ตามมาตรฐาน ASTM C 494 ได้แบ่งสารเคมีผสมคอนกรีตเป็น 7 ประเภท คือ

ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ(Water-reducing admixtures)

ประเภท B สารยืดยาวเวลาการก่อตัว(Retarding admixtures)

ประเภท C สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว(Accelerating admixtures)

ประเภท D สารลดปริมาณน้ำและยืดยาวเวลาการก่อตัว(Water-reducing and retarding
admixtures)

ประเภท E สารลดปริมาณน้ำและเร่งเวลาการก่อตัว(Water-reducing and accelerating
admixtures)

ประเภท F สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก(Water reducing-high range admixtures)

ประเภท G สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดยาวการก่อตัว(Water reducing-high range and retarding admixtures)

คุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 494 เป็นไปตามตารางที่ 2.7

2.5 คุณสมบัติของมอร์ต้าและคอนกรีต

2.5.1 กำลังรับแรงอัด

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าและคอนกรีตได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ปริมาณมวลรวมในส่วนผสม และสารผสมเพิ่มที่เติมลงไป ถึงแม้ว่าคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่ใช้เป็นปูนฉาบ จะมีความสำคัญน้อยกว่าคุณสมบัติด้านอื่น เช่น ความสามารถทำงานได้ หรือการหดตัว แต่ก็มิใช่ให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าและคอนกรีต ดังนี้

ตามมาตรฐาน ASTM C 270 ได้กำหนดกำลังอัดของมอร์ต้าโดยแยกตามประเภทของมอร์ต้า ตามตารางที่ 2.8

Emroy และ Shacklock(1958) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพบว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลง และที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน คอนกรีตที่มีอัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์สูง จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ต่ำ ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณมวลรวมที่สูงขึ้น จะทำให้การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จึงแสดงผลน้อยลง นอกจากนั้นการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ยังเป็นการลดอัตราส่วนเจลต่อช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ซึ่งเป็นผลให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้น

Hewlett(1988) ศึกษาพบว่าการเพิ่มสารกระจายกักฟองอากาศ(Air-entraining Agent)ในคอนกรีตทุกๆ 1 % กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลง 5.5 % ทั้งนี้เพราะปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจึงลดลงด้วย ดังรูปที่ 2.4

Kaya(1985) ได้ศึกษาผลของสารโพลีเมอร์ต่อคอนกรีตกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามปริมาณสารโพลีเมอร์ และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เติมสารโพลีเมอร์ จะต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่เติมสารโพลีเมอร์ ดังรูปที่ 2.5

บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร(2534) พบว่าเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ(Superplasticizer) 1.25 % จะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่อายุ 3, 7, 28, 90 วัน สูงกว่ามอร์ต้าที่ไม่ใส่สารลดน้ำพิเศษถึง 58%, 29%, 24%, 25% ตามลำดับ

สายันท์ ผลิตรกรรม(2533) ได้ศึกษามอร์ต้าที่ผสมปูนฉาบและมอร์ต้าที่ผสมสารผสมแทนปูนขาวพบว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าลดลงทั้งสองกรณี

2.5.2 โมดูลัสยืดหยุ่น

ปัจจัยที่มีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ต้าและคอนกรีต คือ กำลังรับแรงอัด, ความหนาแน่นและคุณสมบัติของมวลรวม Sahlin(1981) ได้แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ต้าและกำลังอัดได้ดังนี้

$$E = 1000f_c \quad (1)$$

$$E = 0.135 \times W^{1.5} \sqrt{f_c} \quad (2)$$

$$E = 1.24 \times 10^5 + 500f_c \quad (3)$$

เมื่อ E = โมดูลัสยืดหยุ่น กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

W = หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้า กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

f_c = กำลังอัดประลัยของมอร์ต้า กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

สมการที่ 1 เป็นสมการที่ง่ายที่สุด แต่ให้ค่าต่ำเกินไปสำหรับมอร์ต้าที่มีกำลังต่ำ และให้ค่าสูงสำหรับมอร์ต้าที่มีกำลังสูงๆ

สมการที่ 2 ใช้ได้ดีกว่าสมการ 1 สำหรับมอร์ต้าที่มีกำลังสูงๆ แต่ให้ค่าสูงเกินไปสำหรับมอร์ต้าที่มีกำลังต่ำ

สมการที่ 3 ให้ค่าสูงสำหรับซีเมนต์มอร์ต้าที่กำลังอัดต่ำ และให้ค่าอยู่ระหว่างสมการที่ 1 และ 2 สำหรับมอร์ต้าที่กำลังอัดสูง

สมการที่ 1 ถึง 3 ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของการทดลองกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าในช่วง 150 - 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 2.6

2.5.3 การหดตัว

การหดตัว(Shrinkage)คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมอร์ต้าหรือคอนกรีต เมื่อเกิดการสูญเสียน้ำ หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีของส่วนผสม การหดตัวมี 4 ประเภทดังนี้

2.5.3.1 การหดตัวแบบพลาสติก(Plastic Shrinkage)จะเกิดก่อนซีเมนต์เฟสจะแข็งตัวโดยเกิดจากการจมน้ำที่เป็นของแข็งในส่วนผสมและการสูญเสียน้ำของคอนกรีตสด

2.5.3.2 การหดตัวแบบออโตจีนีซ(Autogenous Shrinkage)จะเกิดในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดการลดลงของปริมาตร นั่นคือ ปริมาตรของสิ่งที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าปริมาตรน้ำกับปูนซีเมนต์

2.5.3.3 การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาการบอนด์(Carbonation Shrinkage) เกิดในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว สาเหตุเกิดจากปูนขาวอิสระ(Free Lime)หรือคัลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศดังสมการ



จากปฏิกิริยาดังกล่าว จะทำให้เกิดการลดลงของปริมาณเพสต์และเกิดการหดตัว

2.5.3.4. การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ(Drying Shrinkage) เกิดจากการสูญเสียน้ำทั้งจาก คาпилลารี(Capillary) และโพรงเจล(Gel Pore) เกิดในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว มีขนาดและความสำคัญมากกว่าการหดตัวชนิดอื่น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการแตกร้าวได้ การหดตัวที่เกิดขึ้นบางส่วนจะสามารถขยายตัวกลับคืนได้(Reversible Shrinkage) แต่มีอีกส่วนที่ไม่ขยายตัวกลับคืนได้(Irreversible Shrinkage) รายละเอียดแสดงดังในรูปที่ 2.7

ได้มีผู้ที่ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัว ดังนี้

Reichard(1964) พบว่าการใช้มวลรวมเบาซึ่งมีโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยจะทำให้แรงยึดรั้งต่อการหดตัวของซีเมนต์เพสต์น้อยทำให้เกิดการหดตัวมาก

Pickett(1956) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของมวลรวมและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับการหดตัวของคอนกรีตพบว่า เมื่อปริมาตรมวลรวมต่อซีเมนต์มากขึ้นการหดตัวจะลดลง และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากขึ้นการหดตัวก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 2.8

ACI COMMITTEE 224 (1980) พบว่าเมื่อเพิ่มสารลดน้ำและยืดยาวการก่อตัว(Water-reducing and Set-retarding) ในคอนกรีตจะเป็นการลดปริมาณน้ำในคอนกรีตทำให้การหดตัวลดลง

สาขันธ์ ผลิกรรม(2533) ศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณน้ำในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นจะทำให้การหดตัวเมื่อแห้งเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวจะทำให้การหดตัวลดลง

2.5.4 การขยายตัวตามอุณหภูมิ

การขยายตัวตามอุณหภูมิ(Thermal Expansion) คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ปัจจัยที่มีผลต่อการขยายตัวตามอุณหภูมิ คือ สัดส่วนผสม ปริมาณความชื้น และคุณสมบัติของมวลรวม จากการศึกษาของ Meyers(1951) พบว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิของคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวของซีเมนต์เพสต์และสัมประสิทธิ์การขยายตัวของมวลรวม สาขันธ์ ผลิกรรม(2533)พบว่า การเพิ่ม

ปริมาณน้ำในมอร์ต้าจะทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิจะลดลง

2.5.5 ความสามารถทำงานได้

ความสามารถทำงานได้(Workability)ของมอร์ต้าสำหรับปูนฉาบจะดูที่ว่ามีลักษณะเหนียวลื่น ไม่เกิดการแยกแยะ ทำงานง่าย ค่าความเหนียวลื่นหรือความสามารถทำงานได้ของมอร์ต้ามักจะประมาณค่าจากเปอร์เซ็นต์การไหล ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลของมอร์ต้าสำหรับปูนฉาบตามมาตรฐาน BS 4721 ได้แนะนำว่าควรมีการไหล ประมาณ 125 %

Jain(1974) ได้กล่าวถึงองค์ประกอบสำคัญที่มีส่วนสำคัญต่อความสามารถทำงานได้ของปูนฉาบว่าจะขึ้นอยู่กับ ความเป็นพลาสติก ความเหนียวลื่นและการอุ้มน้ำของมอร์ต้า

Brunauer(1973) ศึกษาพบว่าอิออนของคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส มีผลไปหน่วงการเกิดปฏิกิริยาของ C_3A โดย $Ca(OH)_2$ จะทำปฏิกิริยากับ C_3A และน้ำทำให้เกิด C_4AH_{19} เคลือบผิวอนุภาคของ C_3A อัตราการเกิดปฏิกิริยาช่วงนี้จะลดลง และซีเมนต์เพสต์ จะมีสภาพเป็นพลาสติกอยู่ช่วงหนึ่ง การเติมปูนขาวในส่วนผสมปูนฉาบเท่ากับเป็นการเติมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ไปในส่วนผสม ซึ่งจะหน่วงระยะคอร์เมนทให้ยาวขึ้น ปูนฉาบที่ผสมปูนขาวจึงมีสภาพพลาสติกอยู่ได้นาน

Kaya(1985) ได้ศึกษาคอนกรีตที่ผสมสารโพลีเมอร์พบว่า ค่ายุบตัวของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้ปริมาณสารโพลีเมอร์ 0-0.4 % (โดยน้ำหนักของซีเมนต์) เมื่อเพอร์ไลต์ 0.4-1.5 % ค่ายุบตัวจะเพิ่มขึ้นและหลังจากนั้นค่าการยุบตัวของคอนกรีตจะลดลงเมื่อเพิ่มสารโพลีเมอร์ดังรูปที่ 2.9

2.6 การศึกษาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

การศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จุดประสงค์ก็เพื่อที่จะทำนายคุณสมบัติของมอร์ต้าซึ่งจะได้สัดส่วนผสมเบื้องต้น หรือมีจุดประสงค์ 2 ประการคือ

2.6.1 เพื่อเลือกวัสดุผสมของมอร์ต้าให้เหมาะสม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ทราย และสารผสมเพิ่ม ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

2.6.2 เพื่อเลือกสัดส่วนผสมว่าควรใช้วัสดุผสมปริมาณเท่าใด เพื่อจะได้มอร์ต้าที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดหรือสภาพการใช้งาน

ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ดังนี้

สายันท์ พลิตกรรม(2533) ได้ศึกษาปูนฉาบที่ผสมปูนขาวที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ระหว่าง 4-6 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ตามมาตรฐาน BS 4721(ให้ค่าการไหลประมาณ

125 %) ได้ผลเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของมอร์ต้าดังรูปที่ 2.10 และสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับปริมาณทรายได้ดังนี้

$$Y_{bl} = 1.0750X + 11.198$$

$$Y_{ba} = 0.6555X + 11.555$$

$$Y_{bb} = 0.6010X + 12.307$$

เมื่อ Y_{bl} = ร้อยละการดูดซึมน้ำของปูนฉาบที่ผสมปูนขาว

Y_{ba} = ร้อยละการดูดซึมน้ำของปูนฉาบที่ผสมสารแทนปูนขาวชนิด A

Y_{bb} = ร้อยละการดูดซึมน้ำของปูนฉาบที่ผสมสารแทนปูนขาวชนิด B

X = อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ เมื่อ $4 \leq X \leq 6$

Ben-Zeitum(1986) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ๆ ได้ดังสมการ

$$CS = -137.0 + 44.9PV - 49.4W/C - 2.63A/C$$

เมื่อ CS = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)

PV = Pulse Velocity (กิโลเมตร/วินาที)

W/C = อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

A/C = อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์

ซึ่งกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากสมการสามารถเปรียบเทียบกับทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.11