

บทที่ 2

แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับแนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลตอบที่ดีที่สุดเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

สำหรับหลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลองคือ เรพลิกชัน แรนดอมไมเซชัน บล็อกกิ้ง (ปารเมศ ชูติมา, 2545)^[13]

เรพลิกชัน หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ เรพลิกชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเรพลิกชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลิกชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

แรนดอมไมเซชัน หมายถึง การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานเป็นจริง การที่แรนดอมไมเซชันการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

บล็อกกิ้ง หมายถึง เทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ได้แก่ การทดลองบล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.1.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

แนวทางการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองประกอบด้วย 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ (ปารเมศ ชูติมา, 2545)^[13]

1) ทำความเข้าใจถึงปัญหา ขั้นตอนนี้จะต้องพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่จะต้องหาข้อมูลอินพุตจากบุคคลอื่นหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนกวิศวกรรม แผนกประกันคุณภาพ แผนกการผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้า และแผนกบุคคล ถ้อยแถลงของปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ

2) เลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลง ในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้อง พิจารณาดูว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดให้ได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมากซึ่งความรู้นี้อาจจะได้จากประสบการณ์และความรู้จากทฤษฎี มีความจำเป็นที่ต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมามีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรกำหนดในระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัย และควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลง

3) เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบ ผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัวและความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่าอะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มทำการทดลองจริง

4) เลือกการออกแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวกับการพิจารณา ขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือการใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองวิศวกรรมส่วนมาก เราควรทราบตั้งแต่เริ่มต้นว่าปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5) ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินงานทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้าไม่มีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เราควรจะนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการออกแบบการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และเราได้ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติก็คือ ทำให้ผู้มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการและสามัญสำนึก จะทำให้ได้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7) สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เราจะนำวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.1.2 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design)

เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยยึดหลักว่าผลรวมปริมาณของปัจจัยทั้งหมดจะต้องเป็น 1.0 (หรือ 100%) เสมอ กล่าวคือ เมื่อปัจจัยหนึ่งมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ย่อมทำให้ปัจจัยอื่นๆ มีสัดส่วนลดลง ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่ไม่ใช่การออกแบบการทดลองแบบผสมที่ตัวแปรแต่ละตัวเป็นอิสระจากการออกแบบการทดลองแบบผสมมีแบบแผนการออกแบบย่อยแบ่งได้เป็น 4 แบบ ดังนี้ (อิสรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, 2544)^[14]

1) การออกแบบแบบเซฟเฟอเพล็กซ์แลตทิซ (Scheffe' Simplex-Lattice) พิกัด (Coordinate) ซึ่งเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของการทดลอง โดยแต่ละตัวแปรสามารถคำนวณระดับได้ดังสมการที่ 2.1

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad (2.1)$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, q$

m = เป็นสัดส่วนของแต่ละปัจจัยจาก 0 – 1 (0 – 100 เปอร์เซ็นต์)

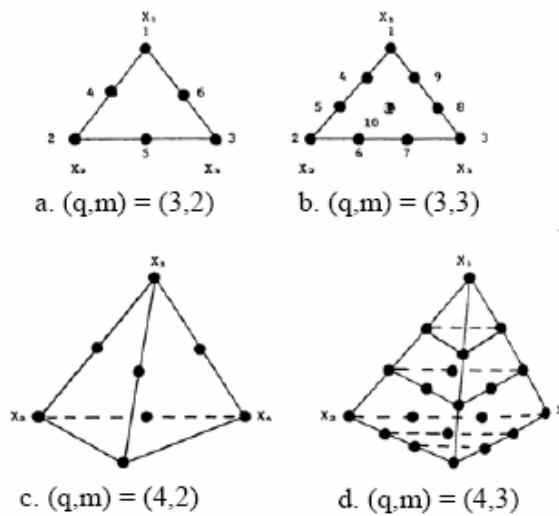
สำหรับในกรณีที่มีจำนวนส่วนผสม (q) เท่ากับ 3 หรือมี 3 ปัจจัย เป็นตัวอย่างที่นิยมใช้ แสดงให้เห็นถึงการออกแบบดังกล่าว หาก $m = 3$ พิกัดที่ได้เป็นส่วนประกอบของ x_1 , x_2 และ x_3 จะเป็น 0, $1/3$ และ $2/3$ ตามลำดับจำนวนของจุดในการทดลองทั้งหมดคำนวณจากสมการที่ 2.2

$$M = (m+q-1)! / m!(q-1)!$$

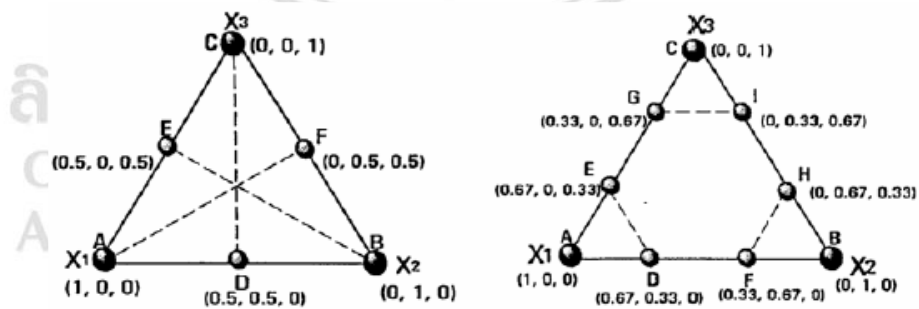
$$M = q(q+1) \dots (q+m-1) / (1)(2) \dots (m) \quad (2.2)$$

$$M = \frac{3 \times 4 \times 5}{1 \times 2 \times 3} = 10$$

ซึ่งตัวอย่างของสิ่งทดลองที่มีจำนวน q และ m ต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.1 และ 2.2

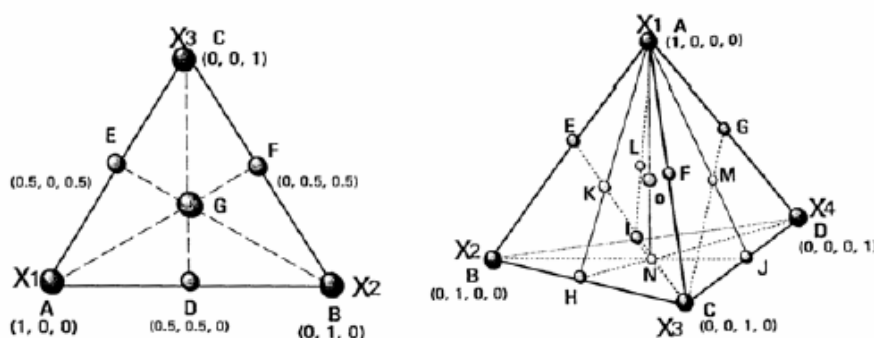


ภาพที่ 2.1 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์เล็กทิส (อิสรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, 2544)^[14]



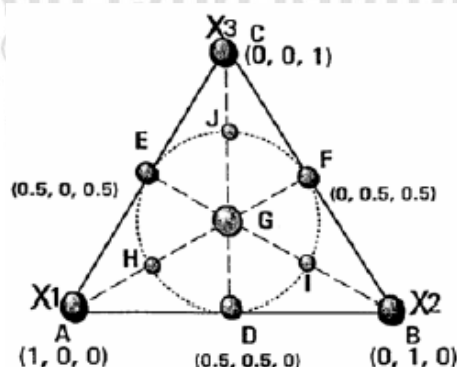
ภาพที่ 2.2 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์เล็กทิสที่มี 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ และ 3 ระดับ (ไม่รวม 0) (อิสรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, 2544)^[14]

2) การออกแบบแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' Simplex-Centroid) เป็นการออกแบบการทดลองที่มีสิ่งทดลองเท่ากับ $2^q - 1$ แต่ละปัจจัยมีสัดส่วนที่เท่ากันทุกปัจจัย สิ่งทดลองประกอบด้วยจุดที่เป็นส่วนผสมเดี่ยว (Pure Component) ต่างๆ หมายถึงสิ่งทดลองที่มีปัจจัยนั้น 100 เปอร์เซ็นต์ หรือเท่ากับ 1.0 และ 0.5, 0.5, 0, ..., 0 เป็นส่วนผสมคู่ (Binary mixtures) และ $1/3, 1/3, 1/3, 0, \dots, 0$ สำหรับส่วนผสม 3 ชนิด และ $1/q, 1/q, 0, \dots, 0$ สำหรับส่วนผสมแบบคิวนารี (q-nary mixtures; centroid) และจุดกึ่งกลาง ($1/q, 1/q, \dots, 1/q$) ตัวอย่างของสิ่งทดลองต่าง ๆ สำหรับ 3 และ 4 ปัจจัย ดังแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' Simplex-Centroid) (อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, 2544) ^[14]

3) การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แอคเซียล (Simplex-Axial) เป็นการออกแบบการทดลองโดยเน้นจุดที่เป็นส่วนประกอบต่างๆ ของทุกปัจจัย ตั้งแต่จุด H, I และ J โดยจุดทั้ง 3 ดังกล่าว มาจากจุดกึ่งกลางของแต่ละส่วนย่อย จากภาพที่ 2.4 หากพิจารณาจุด A, D และ E จะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมย่อยโดยมีจุด H เป็นจุดกึ่งกลางสามเหลี่ยมดังกล่าว ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับจุด I และ J



ภาพที่ 2.4 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แอคเซียล (Simplex-Axial) (อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, 2544) ^[14]

4) การออกแบบแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทิส (Extreme Vertices) เป็นการออกแบบการทดลองแบบที่มีข้อจำกัดสัดส่วน (Design with constraints on proportion) หรือ แบบที่มีข้อจำกัด (Constrained Mixture Design) กล่าวคือ แผนการทดลองนี้ระดับในแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องเป็น 0-100% โดยอาจเป็น 30-40% (0.30-0.40) หรือ 15-25% (0.15-0.25) เป็นต้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความจำเป็นโดยพื้นฐานในการทดสอบบางอย่าง เช่น ในการผลิตอาหารบางชนิดที่มีส่วนผสมของกลูเตน (Gluten) โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Soy Protein Isolated) และน้ำพบว่า ต้องมีส่วนผสมของกลูเตนและโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง รวมกันอย่างน้อย 50% (ใช้ในปริมาณเท่ากัน ชนิดละ 25%) จึงสามารถจับเป็นก้อนเพื่อทำการรีดเป็นแผ่นได้ ดังนั้นส่วนผสมของกลูเตนและโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองที่ต่ำกว่า 50% จึงไม่เป็นที่สนใจขณะเดียวกัน พบว่าหากมีน้ำต่ำกว่า 30% จะไม่สามารถปั้นให้เป็นก้อนได้ ดังนั้นจึงอาจกำหนดเฉพาะปริมาณขั้นต่ำของส่วนผสมแต่ละชนิดเป็น 25% 25% และ 30% ตามลำดับ โดยให้สังเกตว่า ปริมาณขั้นต่ำของส่วนผสมทั้งสามรวมกันต้องไม่เกินหรือเท่ากับ 100% อย่างเด็ดขาด ไม่เช่นนั้นจะมีเพียงส่วนผสมเดียวที่เป็นไปได้ หรือไม่มีส่วนผสมใดที่เป็นไปได้เลย

นอกจากนี้ แม้ว่าการวางแผนจำเป็นต้องให้ปัจจัยที่ทำการศึกษาในแต่ละสิ่งทดลองรวมกันเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่จำเป็นต้องนำทุกปัจจัยมาศึกษาพร้อมกัน ในส่วนผสมของแต่ละสิ่งทดลองอาจมีปัจจัยจำนวนมาก แต่สนใจศึกษาเพียง 3 ปัจจัย สามารถใช้แผนการทดลองแบบผสมได้ เช่น มีส่วนในผลิตภัณฑ์จำนวน 10 ปัจจัย คือ A – J แต่สนใจ เฉพาะปัจจัย B C และ D ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าว มีสัดส่วนคิดเป็น 18 เปอร์เซ็นต์ ของส่วนผสมทั้งหมดสามารถนำปัจจัย B C และ D มากำหนดเป็นสิ่งทดลองต่าง ๆ ซึ่งมีส่วนผสมที่ต่าง ๆ กัน และในส่วนผสมแต่ละสิ่งทดลองที่ได้ให้คิดเป็น 18 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 82 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือกำหนดให้ใช้ในปริมาณคงที่หรือเป็นปัจจัยคงที่ (Fixed variables)

2.1.3 วิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology)

พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) (ปารเมศ ชูติมา, 2545)^[13] เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (2.3)$$

โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.4)$$

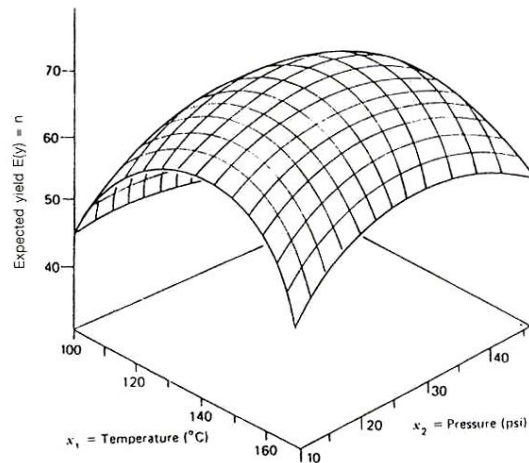
ซึ่งจะเรียกว่าพื้นผิวผลตอบ โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟิก (ภาพที่ 2.5) โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบ ซึ่งในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบของ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่างๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 2.5

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2.5)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ 2.6

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ji} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.6)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 2.5 พื้นผิวผลตอบแทนแบบสามมิติ (ปารเมศ ชูติมา, 2545)^[13]

2.2 เอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา การพัฒนาและหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดูเอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกจะเป็นการศึกษาเอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบา ส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาเอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง และส่วนสุดท้ายจะเป็นการศึกษาเอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบ่มคอนกรีต

2.2.1 เอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

ปัจจุบันในงานก่อสร้างควรที่จะใช้วัสดุที่เบาไปใช้ในงานก่อสร้าง จึงมีการพัฒนาคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาเพื่อช่วยลดแรงกระทำต่อโครงสร้าง ซึ่งการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะมีการแบ่งย่อย 2 ประเภท 1) ใช้วัสดุอื่นทดแทน 2) ใช้สารเคมี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาซิลิกาฟูม (Silica fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และขนาดที่เล็กมากของซิลิกาฟูมซึ่งเล็กกว่าซิลิกาฟูมกว่า 100 เท่า ทำให้สามารถเพิ่มกำลังอัด และความทนทานให้กับคอนกรีตได้ โดย ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2542)^[1] ได้ให้คำอธิบายเกี่ยวกับซิลิกาฟูมว่าเป็นวัสดุที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูง เพิ่มความทนทานให้คอนกรีต แต่มีสิ่งมีต้องให้ความสำคัญในการเติมซิลิกาฟูม คือควรมีการเติมซิลิกาฟูมที่สม่ำเสมอในคอนกรีต และเรื่องทางด้านเศรษฐศาสตร์เพราะราคาซิลิกาฟูมมีราคาที่สูงซึ่งไปในแนวทางเดียวกันงานวิจัย Hooton R.D (1993)^[2] ที่ใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15 และ 20 และทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน ซึ่งพบว่ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 70.7 MPa, 75.2 MPa

และ 74.2 MPa ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีการเติมซิลิกาฟุ่มที่มีกำลังอัดเพียง 55.6 MPa และจากคุณสมบัติของซิลิกาฟุ่มนี้ผู้วิจัยจึงได้เลือกซิลิกาฟุ่มเติมลงไปในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเพื่อให้ได้คุณสมบัติตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด ซึ่งมีลักษณะเดียวกับงานวิจัยของ วีรศักดิ์ ละอองจันทร์ และคณะ (2553)^[3] ที่ได้ใช้กากปูนขาวที่เป็นของเสียจากโรงงานผลิตกระดาษซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซิลิกาฟุ่มเติมลงในคอนกรีตในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ซึ่งผลที่ได้จากการเติมกากปูนขาวคือ กำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น และยังทำให้อัตราการดูดกลืนน้ำลดลงด้วย และยังมีงานวิจัยของ Hauser A. et al (1999)^[4], Mustafa N.Y. (2004)^[5], สุมิตร ส่งพิริยกิจ และปริญญ์ จินตประเสริฐ (2549)^[6] ที่มีผลงานวิจัยไปในแนวทางเดียวกันคือ การเติมวัสดุผสมที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซิลิกาฟุ่มลงไปในการผลิตคอนกรีตจะสามารถทำให้เพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังอัด และความหนาแน่นเชิงปริมาตรในระยะการบ่มคอนกรีตที่ 28 วัน งานวิจัยข้างต้นเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษากระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

2.2.2 เอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองโดยการใช้ออกแบบการทดลองแบบผสม ซึ่งมีงานวิจัยของ พลวริน พลยิ่ง (2551)^[7] ที่ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบผสมในงานวิจัยในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของเทียนหอมเช่นเดียวกับงานวิจัยไปในแนวทางเดียวกับสุรพงศ์ บางพาน (2543)^[8] ที่ใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมเข้ามาปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานเพื่อให้เกิดประโยชน์แก่องค์กร โดยการหาอิทธิพลที่ทำให้ได้ปัจจัยที่เหมาะสมในการสีข้าวกล้อง รวมไปถึงงานวิจัยของ สุชานัน ทวีเกษมสมบัติ (2556)^[9] ที่ได้นำการออกแบบการทดลองแบบผสมในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระดุกไฮดรอกซีอะพาไทต์ – คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส – พอลิเมทิลเมทาไครเลตคอมโพสิต โดยการผลิตวัสดุทดแทนกระดุกด้วยพอลิเมทิลเมทาไครเลตคอมโพสิตจากไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดุกวัว และในงานวิจัยที่ต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการนำวัตถุดิบมาผสมรวมกันอาจต้องใช้ออกแบบการทดลองแบบผสม ซึ่งเช่นเดียวกับงานวิจัยของ ศรินทิพย์ พงศ์สว่าง (2550)^[10] ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบผสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผลไม้รวม โดยใช้ส่วนผสมของผลไม้ 3 ชนิด ได้สูตรการทดลอง 13 สูตร และทำการวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุดของผลิตภัณฑ์ และในการออกแบบการทดลองแบบผสมมีนักวิจัยได้เสนอข้อแนะนำต่างๆ เช่น Lawson J. and J. Erjavec (2001)^[11] แนะนำว่าจุดที่จะถูกเลือกมาทดลองควรประกอบด้วย จุดยอดมุมของรูปหลายเหลี่ยมที่กำหนดได้ (Extreme Vertices), จุดกึ่งกลางด้าน (Edge Center), จุดศูนย์กลางของรูปหลายเหลี่ยมนั้น (Overall Centroid), จุดบนแกนสำคัญเช่นเส้นทแยงมุมหรือแกนสมมาตรของรูปหลายเหลี่ยม

(Axial Point) ก็พอเพียงที่จะสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีเทอมอันตรกิริยาได้แล้ว และในหนังสือของ Cornell (2002)^[12] วิธีการออกแบบการทดลองนี้เป็นการออกแบบโดยการรวมปัจจัยที่ควบคุมได้ ผลรวมของสัดส่วนของส่วนผสมจะเป็นค่าคงที่ ระดับของตัวแปรนี้จะไม่เป็นอิสระต่อกัน และงานวิจัยข้างต้นเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการออกแบบการทดลองแบบผสมในการใช้หาระดับที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบาเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

2.3 ประเภทและคุณสมบัติทั่วไปของส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

2.3.1 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบามีมากมายหลายประเภท หากมองเพียงภายนอกอาจแทบไม่แตกต่างกัน แต่ในความเป็นจริงแล้ว คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่ต่างกันจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบานั้นแตกต่างกันด้วย คอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปอาจแบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ระบบ ดังนี้ (Andrew, S. and William, K, 1978)^[15]

ระบบที่ 1 คือระบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง ซึ่งระบบนี้สามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท ตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต คือ

ประเภทที่ 1 : ใช้ปูนขาว มาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ซึ่งประเภทนี้จะควบคุมคุณภาพได้ยาก ทำให้คุณภาพคอนกรีตที่ได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ มีการดูดซึมน้ำมากกว่า

ประเภทที่ 2 : ระบบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เป็นระบบที่นอกจากจะช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพได้มาตรฐานสม่ำเสมอแล้ว ยังช่วยให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารให้กำลังในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรง ทนทาน กว่าที่ผลิตในระบบอื่นมาก

ระบบที่ 2 คือระบบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง ซึ่งระบบนี้สามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท (Andrew, S. and William, K, 1978)^[15]

ประเภทที่ 1 : ใช้วัสดุเบาเป็นมวลรวม เช่น จีเลื่อย จีเล้า ชานอ้อย หรือ เม็ดโฟม ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาขึ้น แต่จะมีอายุการใช้งานจะสั้น เสื่อมสภาพได้เร็ว และหากเกิดไฟไหม้ สารเหล่านี้อาจจะติดไฟและเป็นพิษต่อผู้อยู่อาศัยได้

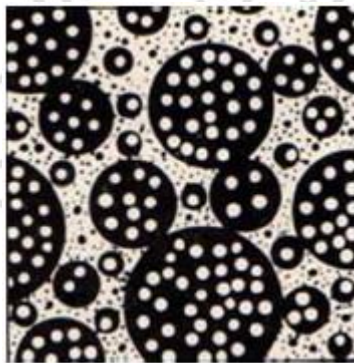
ประเภทที่ 2: ใช้สารเคมีเป็นส่วนผสม เพื่อให้เนื้อคอนกรีตพองตัว และทิ้งไว้ให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง คอนกรีตประเภทนี้จะมีการหดตัวมาก ทำให้ปูนฉาบแตกร้าวได้ง่าย ไม่ค่อยแข็งแรง

คอนกรีตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงนี้ส่วนใหญ่เนื้อผลิตภัณฑ์มักจะมีสีเป็นสีปูนซีเมนต์ ต่างจากคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงซึ่งจะมีเนื้อผลิตภัณฑ์เป็นผลึกสีขาว

ประเภทการใช้งานของคอนกรีตมวลเบา

ประเภทการใช้งานคอนกรีตเบา จำแนกตามลักษณะวัสดุผสม แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ (Andrew, S. and William, K, 1978)^[15]

1) คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate Concrete) ดังแสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา (Andrew, S. and William, K, 1978)^[15]

เป็นคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 300 – 1,800 กก./ลบ.ม. ได้จากการใช้วัสดุผสมที่มีช่องว่างหรือรูพรุนอยู่ภายในแทนที่ส่วนผสมของมวลรวมหยาบ ทำให้คอนกรีตที่ได้มีน้ำหนักเบา มีกำลังไม่สูงมากนัก และมีการดูดซึมน้ำที่สูง

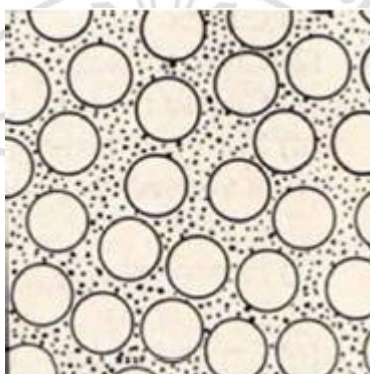
2) คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด (No-Fines Concrete) ดังแสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด (Andrew, S. and William, K, 1978)^[15]

คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด คือ คอนกรีตที่ไม่ยอมให้มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือ ส่วนผสมละเอียดอยู่ในส่วนผสมของคอนกรีตเลย เพื่อไม่ให้อนุภาคขนาดเล็กลงไปอุดตันช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา คอนกรีตประเภทนี้จึงไม่ใส่ทรายลงในส่วนผสม โดยมีเพียงแต่มวลรวมหยาบ (หินหรือมวลรวมเบาอื่นๆ) ซึ่งปกติจะใช้มวลรวมหยาบขนาดเดียว และมีน้ำปูนเคลือบอยู่หนาไม่เกิน 1 – 3 มิลลิเมตร คอนกรีตประเภทนี้มีช่องว่างหรือโพรงอยู่มาก ส่งผลให้กำลังค่อนข้างต่ำ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าประมาณ 640 กก./ลบ.ม. มวลรวมหยาบหลักที่ใช้ในการทำคอนกรีตชนิดนี้ คือ Gravel, Crushed stone, Coarse clinker, Sintered pulverized-fuel ash, Expanded clay หรือ shale, Expanded slate และ Foamed slag

3) คอนกรีตเติมฟองอากาศ (Aerated Concrete) ดังแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 คอนกรีตเติมฟองอากาศ (Andrew, S. and William, K, 1978)^[15]

คอนกรีตเติมฟองอากาศ คือ คอนกรีตที่ได้จากการผสมฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 – 1.0 มิลลิเมตร หรือที่เรียกว่า โฟม ลงในคอนกรีต การผสมมี 3 วิธี (Andrew, S. and William, K, 1978)^[15]

3.1) การผสมโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Aerating) คือ การใช้สารเคมีประเภท Aluminum Powder หรือใช้ Hydrogen Peroxide ที่ร่วมกับ Bleaching Powder ผสมเข้ากับคอนกรีตเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศเหล่านี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์เฟลสต์กับสารเคมี ซึ่งจะทำให้คอนกรีตพองตัวฟูขึ้นมีปริมาณมากกว่าเดิมหลายเท่า และเมื่อแข็งตัวแล้วก็จะกลายเป็นคอนกรีตที่มีรูเล็กๆ อยู่ภายใน

3.2) การผสมสารที่ทำให้เกิดโฟม (Foaming Mixture) คือ การใช้สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-entrained Foam) ผสมร่วมกับคอนกรีต สารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาบนผิวก่อให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ ในปริมาณที่สามารถควบคุมได้ภายในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศนี้จะ

กระจายตัวอยู่สม่ำเสมอและไม่ทะลุซึ่งกันและกันมากมาย ด้วยวิธีนี้อาจทำคอนกรีตให้เบากว่าน้ำได้ถึง 3 เท่า คือหนักเพียง 320 กก./ลบ.ม. และอาจเรียกคอนกรีตประเภทนี้ว่า “Gas Aerated Concrete”

3.3) การผสมโดยทำให้เกิดโฟมก่อนแล้วผสมกับมอร์ตาร์ เป็นวิธีการสร้างฟองก่อนแล้วจึง ผสมร่วมกับซีเมนต์เฟลสต์ (Preformed foam) อาจเรียกคอนกรีตประเภทนี้ว่า Foam Aerated Concrete หรือ Cellular Lightweight Concrete

จำแนกตามหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเบา แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1) คอนกรีตเบาชนิดทำฉนวน (Insulating Lightweight Concrete) มีหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 315 – 1,100 กก./ลบ.ม. และมีกำลังต้านทานแรงอัดเมื่ออายุ 28 วัน ระหว่าง 6 – 70 กก./ลบ.ม.

2) คอนกรีตเบาชนิดทำเป็นโครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete) มีหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 1,400 – 1,800 กก./ลบ.ม. และมีกำลังต้านทานแรงอัดเมื่ออายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 170 กก./ลบ.ม.

3) คอนกรีตชนิดกึ่งเบา (Semi-Lightweight Concrete) มีหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 1,800 – 2,050 กก./ลบ.ม. นำมาทำพวกคอนกรีตบล็อกสำหรับกำแพงรั้ว และใช้เป็นวัสดุทนไฟ กำลังต้านทานแรงอัดไม่ต่ำกว่า 120 กก./ลบ.ม.

2.3.2 คุณสมบัติทั่วไปของส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะมีส่วนผสมทั้งหมด 5 ตัว คือ ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ โฟม และซิลิกาฟูม ซึ่งวัสดุผสมแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่มีผลต่อการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ ทำหน้าที่ให้กำลังของคอนกรีตโดยทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำเกิดเป็นของเหลวหนืดจะทำหน้าที่หล่อลื่นคอนกรีตให้สามารถเทได้ และยึดประสานมวลรวมเข้าด้วยกันเมื่อแข็งตัวจะให้กำลังกับคอนกรีตคุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเคมีและความละเอียดของเม็ดปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดกับยิปซัม 5 ประเภทคือ

ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้สำหรับการก่อสร้างปกติทั่วไปที่ไม่อยู่ในสภาวะอากาศที่รุนแรง หรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือที่ที่ความร้อนเกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอันตราย

ประเภทสอง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดินหนาๆ หล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอม่อ และสะพาน เป็นต้น

ประเภทสาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (High-early Strength Portland Cement) หรือที่เรียกกันว่า “ซูเปอร์ซีเมนต์” ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนและโดยการเติมสารอื่น โดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น หรือโดยการเผาให้ดีขึ้น มีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการจะแข็งเร็ว หรือแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้น และคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้

ประเภทสี่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด ซึ่งปูนชนิดนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตหยาบ เช่น เขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะแข็งตัว

ประเภทห้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง สำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีด่าง (Alkaline) สูง มีระยะเวลาการแข็งตัวช้ากว่าประเภทหนึ่ง

2) ทรายซึ่งเป็นวัสดุผสมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ทั้งนี้ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร วัสดุผสมที่เล็กกว่านี้เรียกว่า ฝุ่น (Silt หรือ Clay) ซึ่งทรายเป็นวัตถุที่แทรกตัวเข้าไปในระหว่างส่วนโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งหินแทรกเข้าไปไม่ได้ โดยการเคลือบและยึดประสานด้วยซีเมนต์ ถ้าขาดทรายอุดช่องว่างจะทำให้ความแข็งแรง การยึดเหนี่ยวต่ำลง โดยแหล่งกำเนิดของทรายมี 4 แห่ง (วินิต ช่อวิเชียร, 2539)^[18] ได้แก่

1. ทรายบกหรือทรายบ่อ (Bank หรือ Pit Sand) เกิดจากการแตกแยกเสียหายชำรุดของหินทราย เนื่องจากสภาพภูมิอากาศซึ่งฝังอยู่ในพื้นดินเป็นแหล่งๆ มักนิยมใช้เนื่องจากทรายชนิดนี้มีเหลี่ยมคมทำให้เกิดความแข็งแรงสูง แต่ทรายชนิดนี้มักจะมีดิน ฟิซ ซากสัตว์ปนอยู่ด้วยเสมอซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการและยอมรับให้มีอยู่ในทรายน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ดังนั้นเมื่อจะนำมาใช้ต้องนำทรายมาล้างหรือแยกให้สะอาด

2. ทรายแม่น้ำ (River Sand) ทรายชนิดนี้อยู่ทั่วไปในแถบที่ราบลุ่มตามท้องน้ำลำคลองเก่า สันดอนทรายชนิดนี้เกิดจากปรากฏการณ์ของธรรมชาติถูกน้ำพัดพาจากที่อื่นมารวมกันอยู่ ซึ่งทรายชนิดนี้เป็นทรายสะอาด ด้วยน้ำเป็นตัวพัดพาทำความสะอาดเอาผงโคลน เศษวัสดุอื่นๆตกลงตามทาง ดังนั้นทรายแม่น้ำจึงสะอาดพอที่จะนำมาใช้งาน ในส่วนข้อเสียที่เกิดจากการกระทบกนตอนพัดพาทำให้เม็ดแตกแยกถูกน้ำชะละลายจึงมีลักษณะค่อนข้างกลม ส่วนมากปราศจากเหลี่ยมคมสำหรับยึดเกาะทำให้การประสานกันกับส่วนของคอนกรีตไม่ดีเมื่อเทียบกับทรายบก ดังนั้นการพิจารณาในการนำมาใช้งานต้องคำนึงถึงผลที่เกิดกับงานในด้านต่างๆ ด้วย

3. ทรายทะเล พบได้ตามชายทะเล หรือบนบกห่างจากทะเลแต่ยังมีความเค็ม และยังมีเกลือติดอยู่ โดยก่อนนำไปใช้ต้องนำไปล้างน้ำจืดให้สะอาดเสียก่อนจึงนำไปใช้ได้ ทรายทะเลไม่ค่อยได้รับความนิยมนำมาใช้งานคอนกรีต เนื่องจากมีความละเอียดสูง

4. ทรายที่ทำขึ้นจากการร่อน เป็นหินที่มนุษย์ทุบหรือย่อยเป็นก้อนเล็กๆ ขนาดเหมือนทรายซึ่งเรียกว่า “ทรายประดิษฐ์” (Manufactured Sand) ซึ่งทรายประดิษฐ์มีการทำขึ้นใช้งานในบางประเทศแล้ว เนื่องจากการขาดแคลนทรายธรรมชาติ

ทรายที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างหรือในงานคอนกรีต ได้แก่ ทรายเม็ดละเอียดเม็ดเล็ก (ทรายอูซุซยา) ขนาด 0.5-1.5 มิลลิเมตร ใช้ในงานปูนก่อปูนฉาบ ทรายเม็ดกลาง (ทรายอ่างทอง) ขนาด 1-2 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร ใช้ในงานเทคอนกรีต ปูนก่อที่ต้องรับแรงอัด ปูนฉาบผนัง พื้นคานและงานคอนกรีตทั่วไป ทรายหยาบเม็ดใหญ่ (ทรายราชบุรีสิงห์บุรี) ขนาด 2-4 มิลลิเมตร ใช้ในงานคอนกรีตเทพื้นฐานรากและในที่ที่ต้องการรับแรงอัดมากๆ

3) น้ำ เป็นส่วนผสมทำคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้าง เพื่อให้คอนกรีตมีคุณภาพที่ดีมีความแข็งแรง โดยที่ปริมาณและคุณภาพของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีต เนื่องจากสิ่งเจือปนต่างๆ ในน้ำจะส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีต เช่น ความสามารถเทได้ ระยะเวลาการก่อตัว เวลาการแข็งตัว ความต้านแรงอัด หรือ กำลัง การเปลี่ยนแปลงปริมาตร สีของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ การเกิดสนิมต่อเหล็กเสริม น้ำที่มีคลอรีน เช่น น้ำทะเล น้ำเค็ม และน้ำกร่อย ไม่เหมาะสมสำหรับผสมคอนกรีต เพราะจะทำให้เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเป็นสนิมได้ น้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างมีหน้าที่หลักดังนี้

1. ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพื่อทำให้เกิดการก่อตัว แข็งตัว กำลัง และความคงทนของคอนกรีต

2. ทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้

3. ใช้บ่มคอนกรีตให้มีกำลังเพิ่มขึ้นและเป็นการป้องกันปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากการสูญเสียน้ำของคอนกรีต

4. ใช้ล้างมวลรวมที่สกปรกให้สะอาดพอที่จะนำมวลรวมมาใช้ผสมทำคอนกรีตได้

ทั้งนี้สิ่งเจือปนที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีตมี 3 ประเภท คือ ตะกอน สารละลายอินทรีย์ และสารละลายอนินทรีย์ ซึ่งถ้ามีสิ่งเจือปนนี้ปริมาณน้อยก็จะไม่ก่อให้เกิดผลเสียร้ายแรง และวิธีสังเกตว่าน้ำนั้นใช้ผสมคอนกรีตได้หรือไม่ มีวิธีตรวจสอบเบื้องต้นดังนี้

- ความสะอาด น้ำต้องไม่มีสารเน่าเปื่อยปนเปื้อน หรือตะไคร่น้ำ
- สีน้ำต้องใส ถ้ามีสีแสดงว่ามีสารแขวนลอยต่างๆมาก
- กลิ่น น้ำต้องไม่มีกลิ่นเน่า ถ้ามีกลิ่นเน่าแสดงว่าน้ำมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก
- รส น้ำต้องไม่มีรส ถ้ามีรสกร่อย หรือเค็ม แสดงว่ามีเกลือแร่อยู่มาก ถ้ามีรสเปรี้ยวแสดงว่าเป็นกรด ถ้ามีรสฝาดแสดงว่าเป็นด่าง

4) โฟม ทำหน้าที่แทรกตัวในเนื้อคอนกรีตเนื่องจากคอนกรีตพรุน มีโพรง ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงมีน้ำหนักเบา โฟมเป็นฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 – 1.0 มิลลิเมตร โดยโฟมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีการผสมมี 3 วิธี คือ

1. การผสมโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Aerating) คือ การใช้สารเคมีประเภท Aluminum Powder หรือใช้ Hydrogen Peroxide ที่ร่วมกับ Bleaching Powder ผสมเข้ากับคอนกรีตเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศเหล่านี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์เฟสกับสารเคมี ซึ่งจะทำให้คอนกรีตพองตัวฟูขึ้นมีปริมาตรมากกว่าเดิมหลายเท่า และเมื่อแข็งตัวแล้วก็จะกลายเป็นคอนกรีตที่มีรูเล็กๆอยู่ภายใน

2. การผสมสารที่ทำให้เกิดโฟม (Foaming Mixture) คือ การใช้สารกระจายฟองอากาศ (Air-entrained Foam) ผสมร่วมกับคอนกรีต สารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาบนผิวก่อให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ ในปริมาณที่สามารถควบคุมได้ภายในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศนี้จะกระจายตัวอยู่สม่ำเสมอและไม่ทะลุซึ่งกันและกันมากมาย ด้วยวิธีนี้อาจทำคอนกรีตให้เบากว่าน้ำได้ถึง 3 เท่า คือหนักเพียง 320 กก./ลบ.ม. และอาจเรียกคอนกรีตประเภทนี้ว่า “Gas Aerated Concrete”

3. การผสมโดยทำให้เกิดโฟมก่อนแล้วผสมกับมอร์ต้า เป็นวิธีการสร้างฟองก่อนแล้วจึง ผสมร่วมกับซีเมนต์เฟส (Preformed foam) อาจเรียกคอนกรีตประเภทนี้ว่า Foam Aerated Concrete หรือ Cellular Lightweight Concrete

5) วัสดุผสมเพิ่ม ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed Silica Fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง $2,000^{\circ}\text{C}$ ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO_2 ซึ่งต่อมาจะออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคนาขนาดเล็กมากๆของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 μm มีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 m^2/g (โดยวิธี Nitrogen Absorption) ขนาดของซิลิกาฟุ้ง (0.1 μm) เป็นขนาดเล็กมากๆ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆของซิลิกาฟุ้งจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้าสำหรับโรงงานของ Silicon Metal and Ferrosilicon Alloy จะมีผลพลอยได้ของซิลิกาฟุ้งที่ร้อยละ 75 หรือมากกว่าจะประกอบด้วยซิลิกอนกว่าร้อยละ 85 ถึง 95 ที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกซึ่งพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนในโรงงาน Ferrosilicon จะมีผลพลอยได้ของซิลิกอนประมาณร้อยละ 50 และพบว่าซิลิกาที่มีอยู่จะน้อยและเป็นผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านี้ในคอนกรีตไม่ดีขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)^[1]

องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี SiO_2 ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO_2 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้งมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน จะพบว่ามียังมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังตารางที่ 2.1

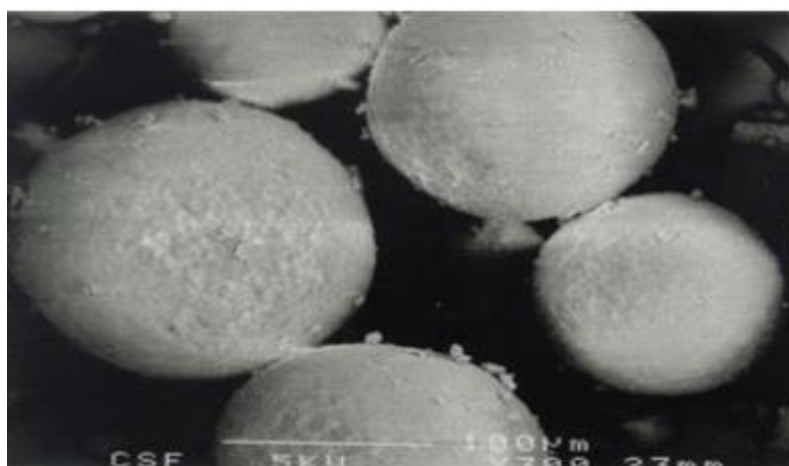
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และซิลิกาฟุ้ง

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภท I (ร้อยละ)	เถ้าถ่านหิน (ร้อยละ)	ซิลิกาฟุ้ง (ร้อยละ)
SiO ₂	20	48	92
Al ₂ O ₃	5	26	0.7
Fe ₂ O ₃	3	10	1.2
CaO	60	5	0.2
MgO	1.1	2	0.2
SO ₃	2.4	0.7	-
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.6
LOI	2	3	-

(ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)^[1]

คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ้งที่เห็นชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงสีค่อนข้างดำหรือเทาหรือเทาอมขาวที่ละเอียดมาก แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed Silica fume) จะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟุ้งหลายๆ เม็ดเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ้งมีค่าประมาณ 2.2 ความละเอียดทดสอบโดยวิธีของเบลนมีค่าประมาณ 150,000 cm²/g ขณะที่ของปูนซีเมนต์มีค่าเพียง 3400 cm²/g ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อขยายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 mm ขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 15 mm เนื่องจากมีขนาดที่เล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย ดังนั้นจึงนิยมนำซิลิกาฟุ้งมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า ซิลิกาฟุ้งควบแน่น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.9 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ตามตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.9 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟุ่มควบแน่น (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)^[1]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ่ม เถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ I	เถ้าถ่านหิน	ซิลิกาฟุ่ม
ความละเอียดของเบด (cm ² /g)	3400	3800	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.4	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือสีน้ำตาล	เทาดำ เทาอมขาว

(ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)^[24]

การใช้ซิลิกาฟุ่มในคอนกรีต

ในประเทศไทย อเมริกา และยุโรป จะใช้ซิลิกาฟุ่มในการผสมคอนกรีตโดยการผสม “แยก” กล่าวคือใส่ซิลิกาฟุ่มในการผสมคอนกรีต แต่ที่ประเทศแคนาดานอกจากการผสมแยกแล้ว ยังมีการใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ โดยมีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ราวร้อยละ 8

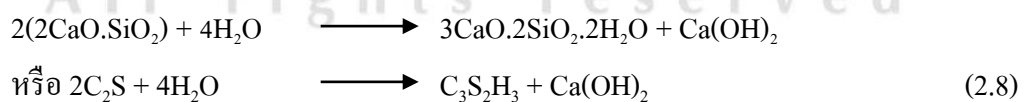
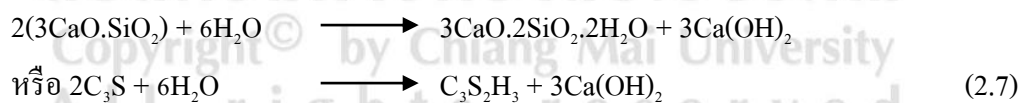
เนื่องจากซิลิกาฟุ่ม มีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่งหรือใช้งานมากพอสมควรเพราะหากไม่ระวังให้ดีอาจปลิวไปตามลมได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการใช้ซิลิกาฟุ่มในรูปที่ผสมกับน้ำให้อยู่ในรูปของเหลวข้น (Slurry Form) อย่างไรก็ตามโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จหลายๆแห่งยังคงใช้ซิลิกาฟุ่มในรูปของผงหรือซิลิกาฟุ่มควบแน่น เช่นเดิม สำหรับอันตรายของการสูดซิลิกาฟุ่มเข้าไปทางลมหายใจยังไม่มีรายงานที่เด่นชัดนัก แต่วัสดุที่ละเอียดขนาดนี้ไม่ว่าจะเป็นอะไรก็ตามล้วนเป็นวัสดุหรือสิ่งแปลกปลอมของร่างกายทั้งสิ้น จึงควรหลีกเลี่ยงให้ได้รับเข้าสู่ร่างกายให้น้อย

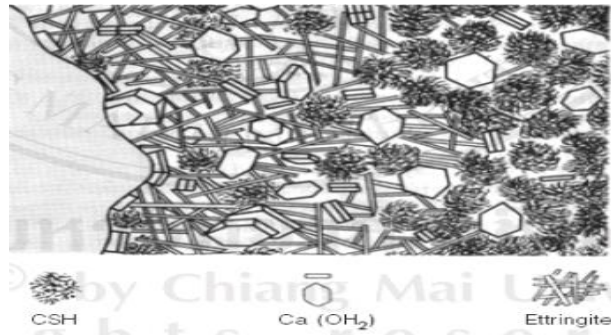
ที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ นอกจากนี้ U.S. Occupational Safety and Health Agency (OSHA) ได้ระบุไว้ว่า ปริมาณฝุ่นในที่ซึ่งปฏิบัติงานไม่ควรสูงเกิน 15 mg/m^3 ส่วน American Conference of Governmental Industrial Hygienists ให้ค่าที่ต่ำกว่าคือปริมาณของฝุ่นในที่ทำงานไม่ควรมีค่าเกิน 10 mg/m^3 ซึ่งถ้า ปริมาณของฝุ่นที่เกิดในที่ทำงานมีค่าเกินนี้จะต้องใช้น้ำกากันฝุ่นสวมป้องกันในขณะที่ทำงาน การใช้ซิลิกาฟุ้งควมแน่นแทนซิลิกาฟุ้งจะสามารถลดปัญหานี้ได้ เพราะซิลิกาฟุ้งควมแน่นจะมีขนาด ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และไม่ปลิวลมง่ายนัก (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)^[1]

การเกิดปฏิกิริยาของน้ำกับคอนกรีต

หน้าที่หลักของน้ำ คือ ผสมกับปูนซีเมนต์ และทำปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดความร้อน (Heat of Hydration) เป็นปริมาณความร้อนที่ปูนซีเมนต์คายออกมาในการทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดการก่อตัว และแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ โดยสารประกอบ เหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกันและกัน ทำให้ปฏิกิริยาที่ได้มีความผิดแผกไปบ้างจาก ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบบริสุทธิ์แต่ละตัวกับน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของ ซีเมนต์เพสต์ ซึ่งสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ประกอบด้วยไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 : \text{C}_3\text{S}$) และไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 : \text{C}_2\text{S}$) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}_3\text{A}$) และเตตระ แคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537)^[17]

ไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสม กับน้ำจะทำปฏิกิริยาได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate: $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} : \text{CSH}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide : $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 โดยลักษณะ ดังภาพที่ 2.10

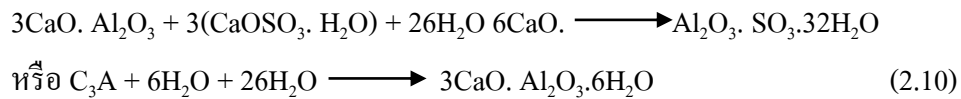
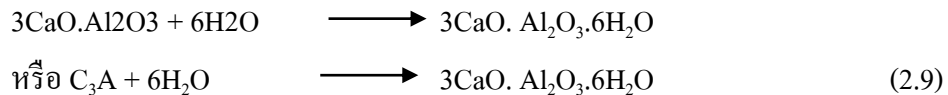




ภาพที่ 2.10 ภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2548)^[16]

ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยขั้นตอนที่ทำให้ปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นที่ 1 ไตรแคลเซียมซัลเฟตผสมกับน้ำเกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว ซึ่งอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นจะลดลงและหยุดในเวลา 15 นาทีแรก ขั้นที่ 2 ไม่ค่อยมีปฏิกิริยาเรียกว่าระยะดอร์แมนต์ (Dormant Period) หรือระยะสงบ สภาพเหลวและสามารถลื่นไถลได้ ช่วงเวลาหนึ่ง ขั้นที่ 3 เป็นการทำปฏิกิริยาช่วงที่ 2 เริ่มประมาณ 2-3 ชั่วโมงหลังจากไตรแคลเซียมซัลเฟตผสมกับน้ำซึ่งตรงกับเวลาการก่อตัวระยะต้น มีการคายความร้อนอย่างต่อเนื่อง และอัตราการเกิดความร้อนจะสูงสุดเมื่ออายุได้ 4-8 ชั่วโมง เกิดการก่อตัวสุดท้ายขึ้น เริ่มเกิดการแข็งตัวโดยปฏิกิริยาจะค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นน้อยลงแต่ยังคงมีต่อไป ในทันทีที่เกิดปฏิกิริยาแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ทำให้ผงซีเมนต์กลายเป็นวุ้น (Gel) และเป็นซีเมนต์เหนียว ซึ่งจะเป็นตัวประสานผิวระหว่างกันของมวลรวมเพื่อให้สามารถยึดเกาะกันแน่นเมื่อแข็งตัวแล้วทำหน้าที่เคลือบหินทรายให้เปียกเพื่อให้ปูนซีเมนต์เข้าเกาะหินทรายโดยรอบ ทำหน้าที่หล่อลื่นให้คอนกรีตเกิดความเหลวสามารถเทและกระทุ้งหรือเขย่าเข้าสู่แบบหล่อให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งการทำปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซัลเฟตมีการทำปฏิกิริยากับน้ำในทำนองเดียวกันกับไตรแคลเซียมซัลเฟตแต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นช้ากว่า เพราะไตรแคลเซียมซัลเฟตไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับไตรแคลเซียมซัลเฟต ดังนั้นความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจึงน้อย (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537)^[17]

ปฏิกิริยาต่อมาเป็นการทำปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำอย่างรวดเร็วและได้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) ดังสมการที่ 2.9 ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วจึงจำเป็นต้องผสมยิปซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยา เพราะ C_3A จะทำปฏิกิริยากับไอออนของซัลเฟตได้แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Sulfoaluminate Hydrate, $6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SO_3 \cdot 32H_2O : C_6AS_3H_{32}$) หรือเรียกกันทั่วไปว่าเอททริงไกต์ (Ettringite) ดังสมการที่ 2.10 โดยลักษณะดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ภาพแสดงลักษณะของเอททริงไทต์ (Ettringite) (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2548)^[16]

ปฏิกิริยาของแคลเซียมอลูมินตกับน้ำเมื่อมียิปซัม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนกัน ในขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดเอทริงไทต์มีลักษณะยาวคล้ายเข็มจะเกิดขึ้นเมื่อมีไอออนของซัลเฟตเพียงพอ โดยการเกิดเอทริงไทต์เพิ่มมากขึ้นรอบไตรแคลเซียมอลูมินต ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยากขึ้นและปฏิกิริยาดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาจะเกิดค่อนข้างน้อยและใช้เวลาหลายชั่วโมง เมื่อไอออนของซัลเฟตทำปฏิกิริยาหมดแล้ว ไตรแคลเซียมอลูมินตจะทำปฏิกิริยากับเอทริงไทต์ และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมินตไฮเดรตที่มีซัลเฟตน้อยลงมีชื่อว่า แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมินต (Calcium Monosulfoaluminate, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$: $\text{C}_3\text{ACSH}_{12}$) จะตรงกับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นที่ 3 ปฏิกิริยาจะเกิดเมื่ออายุประมาณ 12-36 ชั่วโมง แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมินตจะสามารถแปลงกลับเป็นเอทริงไทต์เมื่อได้อิออนของซัลเฟตอีก ซึ่งเป็นเหตุผลหลักในการเกิดการกัดกร่อนของสารซัลเฟต เพราะเอทริงไทต์มีปริมาณมากกว่าแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมินตมาก

ปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอลูมินโอเพอร์ไรต์คล้ายกับปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมินต แต่จะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า สารประกอบหลักออกไซด์ (F) จะทำปฏิกิริยาคลายกับอลูมิเนียมออกไซด์ (A) และสามารถแทนที่กันได้ โดยยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอลูมินโอเพอร์ไรต์มากกว่าการหน่วงปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมินต ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างเตตระแคลเซียมอลูมินโอเพอร์ไรต์และยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟลูมินตและซัลโฟ

เฟอร์ไรต์ มีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายเอททริงไคต์สามารถทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่มีซัลเฟตต่ำ ซึ่งปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์มากและไทรแคลเซียมอลูมิเนตต่ำ สามารถทนทานต่อการทำลายของซัลเฟตได้ดี แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนกลับเป็นเอททริงไคต์จากแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตที่เกิดจากเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ไม่เกิดขึ้น (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537)^[17]

2.3.3 ประโยชน์ของอิฐมวลเบาเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญ

คอนกรีตมวลเบาเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตชนิดใหม่ การผลิตส่วนใหญ่เป็นการนำเทคโนโลยีและเครื่องจักรที่นำเข้าจากต่างประเทศ อาทิเช่น เฮอร์เมนี ออสเตรเลีย เป็นต้น ผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุก่อสร้างยุคใหม่ที่มุ่งเน้นให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากการนำไปใช้งานทุกด้าน ด้วยคุณสมบัติพิเศษ คือ ตัววัสดุมีน้ำหนักเบา ขนาดก้อนได้มาตรฐานเท่ากันทุกก้อน ทนไฟ ป้องกันความร้อน ป้องกันเสียง ตัดแต่งเข้ารูปง่าย ใช้งานได้เกือบ 100% ไม่มีเศษเป็นอิฐหัก และที่สำคัญคือ รวดเร็ว สะอาด ลดระยะเวลาในการก่อสร้าง ลดต้นทุนโครงสร้าง และมีคุณสมบัติที่โดดเด่น ดังนี้

- 1) คุณสมบัติทางกายภาพ คอนกรีตมวลเบามีน้ำหนักเบาซึ่งต่างจากอิฐชนิดอื่นๆ เช่น น้ำหนักของการก่ออิฐมอญจะมากกว่าการก่อด้วยอิฐมวลเบา จึงทำให้ต้องเตรียมโครงสร้างเพื่อการรับน้ำหนักในส่วนนี้ ทำให้ต้นทุนโครงสร้างเพิ่มขึ้น
- 2) การกันความร้อน หากเป็นกรณีปกติ “คอนกรีตมวลเบา” จะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าอิฐมอญประมาณ 8-11 เท่า แต่การก่อผนังภายนอกอิฐจะต้องมีความหนา 10 เซนติเมตร และผนังภายในหนา 7 เซนติเมตร ขึ้นไป จึงจะสามารถกันความร้อนได้ดี แต่ในกรณีใช้อิฐมอญก่อ 2 ชั้น ตัวช่องว่างตรงกลาง จะทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี และอิฐแถวด้านในไม่สัมผัสความร้อนโดยตรง จึงทำให้คุณสมบัติตรงนี้ของอิฐมอญจะมีความสามารถในการกันความร้อนได้ดีกว่า แต่การเว้นช่องว่างไม่ควรต่ำกว่า 5 เซนติเมตร
- 3) การกันเสียง ปกติคอนกรีตมวลเบาจะกันเสียงได้ดีกว่าอิฐมอญประมาณ 20% แต่ในกรณีใช้อิฐมอญก่อ 2 ชั้น ช่องว่างตรงกลางจะทำหน้าเป็นฉนวนกันเสียงได้ดีกว่าเกือบ 2 เท่า แต่คอนกรีตมวลเบาจะลดการสะท้อนของเสียงได้ดีกว่าเนื่องจากโครงสร้างของคอนกรีตมวลเบา มีฟองอากาศเป็นจำนวนมากอยู่ภายในทำให้ดูดซับ เสียงได้ดี จึงเหมาะสำหรับห้องหรืออาคารที่ต้องการความเงียบ เช่น โรงภาพยนตร์ หรือห้องประชุม เป็นต้น
- 4) การกันไฟ อิฐมอญก่อ 2 ชั้นมีฉนวนตรงกลาง (ช่องว่างตรงกลาง) จะกันไฟได้ดีกว่าคอนกรีตมวลเบาเล็กน้อยและทนไฟที่ 1,100 องศาเซลเซียส ได้นานกว่า 4 ชั่วโมง ซึ่งนานกว่าอิฐมอญ 2-4 เท่า ทำให้จะช่วยจำกัดความเสียหายในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ได้

5) ความแข็งแรง การใช้งานทั่วไปไม่ต่างกัน แต่ผนังอิฐมวลเบาจะเหมาะสำหรับการใช้วัสดุกรุผนังที่มีน้ำหนักมาก เช่น หินแกรนิต หรือหินอ่อน เป็นต้น

6) น้ำหนักเบาและรับแรงกดได้ดี น้ำหนักเบากว่าอิฐมวลเบา 2-3 เท่า และเบากว่าคอนกรีต 4-5 เท่า ส่งผลให้ประหยัดค่าก่อสร้าง โครงสร้างอาคาร และเสาเข็มลงได้อย่างมาก แต่อาคารยังคงมีความแข็งแรงเท่าเดิมจากโครงสร้างของคอนกรีตมวลเบาที่ประกอบไปด้วย ฟองอากาศจำนวนมากทำให้มีน้ำหนักเบา และสามารถรับแรงกดได้ดี ซึ่งจากคุณสมบัติข้อนี้ทำให้ผู้ใช้งานสามารถประหยัดต้นทุนในการก่อสร้างได้มาก ยกตัวอย่างเช่น ไม่ต้องลงเสาเข็มลึกมาก เนื่องจากโครงสร้างเบาและสามารถก่อสร้างโดยใช้โครงสร้างที่เล็กลง ทำให้ประหยัดการใช้เหล็ก และมีพื้นที่ใช้สอยภายในมากขึ้น

7) ประหยัดพลังงาน เนื่องจากสามารถกันความร้อนได้ดีกว่าอิฐมวลเบาแล้วยังใช้เครื่องปรับอากาศที่มีขนาดเล็กลงได้ ช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าไปได้มาก กันความร้อนได้ดีกว่าอิฐมวลเบาถึง 4-8 เท่า จึงช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคารได้เป็นอย่างดี ช่วยลดค่าไฟฟ้าได้ถึง 30%

8) ใช้งานง่าย และรวดเร็ว เนื่องจากการผลิตที่เป็นมาตรฐานทำให้สินค้าที่ออกมาเท่ากันทุกก้อน ไม่เหมือนกับอิฐมวลเบาที่ยังมีความไม่เป็นมาตรฐานอยู่ทำให้การก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตมวลเบาจะใช้เวลาในการก่อและเกิดการสูญเสียน้อยกว่า โดยเฉลี่ยแล้วภายใน 1 วันการก่อผนังโดยใช้อิฐมวลเบาจะได้พื้นที่ 25 ตารางเมตร ไม่ต้องอาศัยความชำนาญของช่าง สามารถตัดแต่งเลื่อย ใสกระจก ฝังท่อระบบได้โดยใช้เครื่องมือเฉพาะที่ใช้งานง่าย และหาซื้อได้ทั่วไป ขณะที่หากใช้อิฐมวลเบาจะก่อได้เพียง 12 ตารางเมตร นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดวัสดุอื่นๆ เช่น ปูนฉาบด้วย เป็นต้น เนื่องจากสามารถก่อฉาบได้บางกว่าช่วยจำกัดความเสียหายในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ได้

9) มิติเที่ยงตรง ขนาดมิติเที่ยงตรง แน่นนอน ได้ชิ้นงานที่เรียบ สวยงาม มีหลายขนาดให้เลือก ประหยัดวัสดุ และ แรงงานในการก่อ ฉาบ

10) อายุการใช้งาน ยาวนานเท่าโครงสร้างคอนกรีต (50 ปี) เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว ยิปซัม สารกระจายฟอง และเหล็กเส้น จึงมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า อิฐมวลเบาซึ่งมีส่วนผสมส่วนใหญ่ คือ ดิน