

บทที่ 2

คอนกรีตผสมรณะสูงผสมซีเมนต์ลอย

2.1 ซีเมนต์ลอย

2.1.1 นิยาม และแหล่งที่มา

ตามมาตรฐานของ ASTM C 618-80 ได้ให้คำนิยามของซีเมนต์ลอยไว้ว่า “ซีเมนต์ลอยคือ วัสดุเม็ดละเอียดที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหิน” โดยส่วนมากจะได้มาจากการขบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน

ถ่านหินมีหลายชนิด เช่น พีท, ลิกไนต์, ซับ-บิทูมินัส, บิทูมินัส และแอนทราไซต์ เมื่อเผาถ่านหินลิกไนต์ จะเหลือถ่านหินประมาณ 25 % ของปริมาณถ่านหินที่เผา โดยสามารถแบ่งถ่านหินลิกไนต์ได้ดังนี้

1. ถ่านลอย (Fly Ash, Pulverized Fuel Ash, Dry Ash) เป็นถ่านที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน และถูกดักจับไว้ได้ในเครื่องดักจับ (Electrostatic Precipitator) โดยจะมีประมาณ 82 % ของปริมาณถ่านทั้งหมด
2. ถ่านหนัก (Bottom Ash, Wet Ash) เป็นถ่านที่เกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านในบริเวณสันดาป (Combustion Zone) โดยในบริเวณนี้อุณหภูมิจะสูงพอที่จะหลอมถ่านที่เป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่กันเตา โดยมีประมาณ 18 % ของถ่านทั้งหมด
3. ซีเมนต์ (Slag) เป็นถ่านที่ปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อรวมตัวกันจนมีน้ำหนักมากจะตกลงสู่กันเตา โดยมีปริมาณน้อยมาก

2.1.2 ชนิดของซีเมนต์ลอย

ซีเมนต์ลอยสามารถแบ่งออกตามส่วนประกอบทางเคมี (ASTM C-618) ได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. Class F - ซีเมนต์ลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินแอนทราไซต์ หรือ บิทูมินัส ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 และซีเมนต์ลอยชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน
2. Class C - ซีเมนต์ลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ หรือ ซับ-บิทูมินัส ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานและมีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน (Cementitious Properties) โดยจะมีปริมาณ CaO มากกว่า 10 %

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ

	Class F	Class C	Mae-Moh FA.
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, min %	70.0	50.0	67.12
SO_3 , max %	5.0	5.0	3.64
CaO, %	< 10	>10	22.62
Moisture content, max %	3.0	3.0	0.25
Loss of Ignition, max %	12.0	6.0	0.2

2.1.3 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบที่สำคัญของซีเมนต์ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และออกไซด์ต่าง ๆ เช่น CaO, MgO, MnO, TiO_2 , Na_2O , K_2O , SO_3 และ C โดยซีเมนต์ Class F จะมีปริมาณคาร์บอนมากกว่าซีเมนต์ Class C

เมื่อเผาซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 1,000 °C น้ำหนักส่วนหนึ่งจะหายไปเนื่องจากการเผาไหม้ของสารประกอบคาร์บอน, น้ำ และคาร์บอน แต่ปฏิกิริยาของส่วนประกอบ S และ Fe จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศส่งผลทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่น้ำหนักทั้งหมดนี้ส่วนใหญ่เป็นน้ำหนักที่หายไปของคาร์บอนในซีเมนต์ เรียกว่า น้ำหนักรวมทั้ง 2 ส่วนนี้ว่า การสูญเสียน้ำหนักเมื่อเผาไหม้ (Loss on Ignition, LOI)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบในซีเมนต์

สารประกอบ	Range %
SiO_2	6-45
Al_2O_3	6-23
Fe_2O_3	1-18
CaO	15-44
MgO	3-12
Na_2O	0-11
K_2O	0-2
SO_3	6-30

ปริมาณคาร์บอนในซีเมนต์จะมีความสัมพันธ์อย่างมากต่อปริมาณน้ำที่ต้องการใช้เมื่อผสมซีเมนต์ในคอนกรีต โดยซีเมนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่าจะต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นเมื่อเทียบกับซีเมนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า คาร์บอนในซีเมนต์จะมีลักษณะพรุนและมีพื้นที่ผิวมาก ดังนั้นจึงสามารถดูดซึมน้ำ, อากาศ, สารผสมเพิ่มเติมต่าง ๆ ได้ดี ซีเมนต์สามารถแบ่งได้ตามปริมาณคาร์บอนดังนี้ Group A มีปริมาณคาร์บอน 0-5 %, Group B มีปริมาณคาร์บอน 5-10%, และ Group C มีปริมาณคาร์บอน 8-15 % ส่วนประกอบอื่น ๆ ของซีเมนต์แสดงในตารางที่ 2.2

2.1.4 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

2.1.4.1 ลักษณะของอนุภาค (Particle Shape)

รูปร่างและขนาดของอนุภาคซีเมนต์แตกต่างกันไปตามชนิดของด้านหินที่เผา, อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา, สภาพในการเผาและวิธีการเก็บซีเมนต์ โดยรูปร่างของซีเมนต์จะเป็นส่วนประกอบของแก้ว (Glassy), มีลักษณะกลม ทรงแข็งหรือกลวง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่ทรงกลมกลวงจะเรียกว่า Cenospheres ส่วนทรงกลมที่ประกอบไปด้วยทรงกลมเล็กหลายอันรวมกันจะเรียกว่า Plerospheres

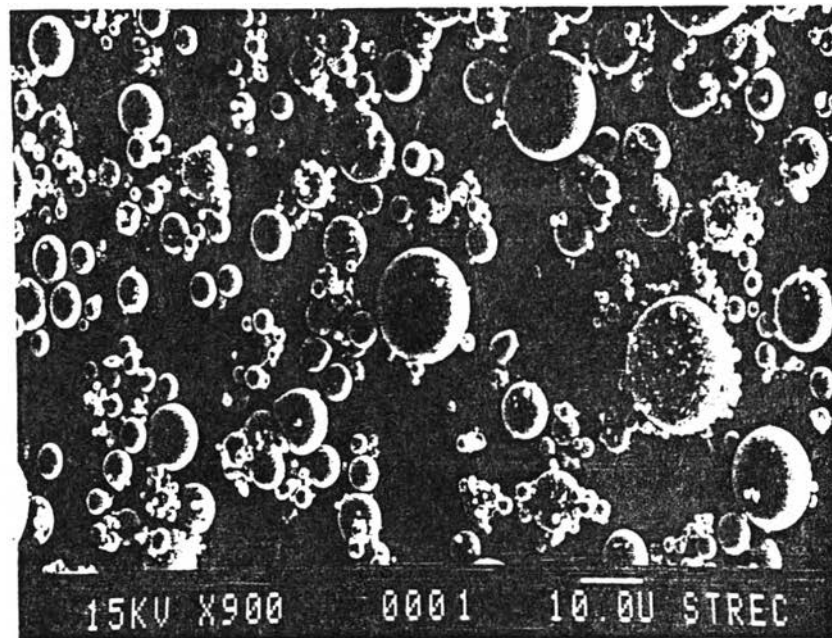
2.1.4.2 ค่าความละเอียด (Fineness)

โดยทั่วไปซีเมนต์จะมีขนาดตั้งแต่ $1 \mu\text{m}$. - 1mm . ค่าความละเอียดของซีเมนต์จะวัดได้จากปริมาณผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve Analysis) ใน ASTM C-311 ได้กำหนดปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ #325 ($45 \mu\text{m}$.) โดยทั่วไปปริมาณของซีเมนต์ที่ค้างบนตะแกรงขนาด $80 \mu\text{m}$. ปริมาณ 6-25 % และปริมาณซีเมนต์ที่ค้างบนตะแกรงขนาด $50 \mu\text{m}$. จะมีปริมาณ 16-40 % และค้างบนตะแกรงขนาด $45 \mu\text{m}$. จะมีปริมาณ 3-14 % โดยน้ำหนัก ส่วนวิธีอื่นสามารถใช้ Particle Size Distribution Analyzer จำแนกขนาดของซีเมนต์ได้ แต่เป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดและมีราคาสูง

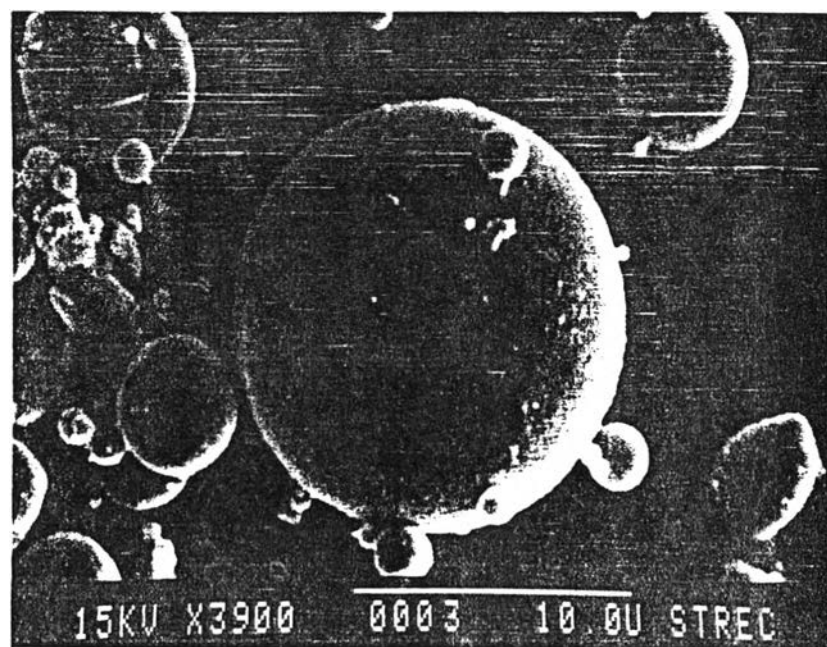
ค่าความละเอียดจะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของคอนกรีต นั่นคือซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถต้านทานแรงอัดสูงขึ้นและมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้น

2.1.4.3 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface)

ซีเมนต์ที่ได้จากการเก็บโดยเครื่องมือดักจับ (Electrostatic Precipitators) จะมีความละเอียดอยู่ในช่วง $4,000-7,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ แต่เครื่องมือดักจับสมัยใหม่สามารถดักจับซีเมนต์ที่มีความละเอียดได้ถึง $12,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ โดยทั่วไปค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถหาได้จากเครื่องมือทดสอบหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air-Permeability Apparatus) โดยใช้วิธีให้อากาศจำนวนหนึ่งไหลผ่านชั้นของซีเมนต์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคความละเอียดของซีเมนต์ในรูปของพื้นที่ผิวจำเพาะ และคำนวณอัตราของอากาศที่ผ่าน หรือเวลาที่ต้องการสำหรับปริมาตรที่กำหนดของอากาศผ่านชั้นซีเมนต์ โดยซีเมนต์จะมีความละเอียดจากวิธีนี้



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของซีเมนต์ลอยขยาย 900 เท่า



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของซีเมนต์ลอยขยาย 3,900 เท่า

อยู่ในช่วง 2,500-5,500 cm²/g

เมื่อเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของซีเมนต์กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อซีเมนต์มีความละเอียดมากจะมีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลทำให้สามารถทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้เร็วกว่าซีเมนต์ที่มีความละเอียดน้อยกว่า

2.1.4.4 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.97-3.02 แต่โดยปกติแล้วจะอยู่ในช่วง 2.2-2.8 แต่บางอนุภาคที่มีลักษณะกลมและกลวง (Cenospheres) จะมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1 จึงสามารถลอยน้ำได้ ซีเมนต์ที่มีปริมาณเหล็กสูง ค่าความถ่วงจำเพาะจะมีแนวโน้มที่สูง แต่ถ้ามีคาร์บอนเป็นปริมาณสูงค่าความถ่วงจำเพาะจะมีแนวโน้มที่น้อยลง

2.1.4.5 ความคงตัว (Soundness)

ความคงตัวเป็นความสามารถของซีเมนต์เพสต์, มอร์ต้าหรือคอนกรีตที่สามารถต้านทานความเค้นภายในที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยไม่เกิดการแตกร้าว หรืออาจจะกล่าวได้ว่า เมื่อส่วนผสมของปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้ว จะไม่เกิดการขยายตัวของเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรมีสาเหตุมาจากปริมาณของ Free Lime, (CaO_{free}) และ Magnesia, (MgO) ในซีเมนต์ โดย CaO และ MgO จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำเกิดเป็นสารประกอบ Ca(OH)₂ และ Mg(OH)₂ ซึ่งจะมีขนาดของโมเลกุลที่ใหญ่ทำให้เกิดความเค้นภายในขึ้น ส่งผลทำให้คอนกรีตขยายตัว ซึ่งก่อให้เกิดรอยแตกร้าว ในสภาวะปกติปฏิกิริยาของ CaO และ MgO จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ดังนั้นในการทดสอบจึงจำเป็นต้องเร่งปฏิกิริยาโดยนำไปอบในไอน้ำที่มีความดันสูงโดยเครื่องมือ Autoclave (ASTM C-618) และกำหนดไว้ว่าถ้าซีเมนต์ผสมซีเมนต์ลอยขยายตัวเกินกว่า 0.8 % ถือว่าไม่มีความคงตัว

2.1.4.6 สี (Colour)

สีของซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของ Fe₂O₃ และปริมาณคาร์บอน โดยถ้าซีเมนต์มีปริมาณคาร์บอนสูงจะมีสีดำและเทา ส่วนซีเมนต์ที่มีปริมาณ Fe₂O₃ สูงจะมีสีน้ำตาล

2.2 ปฏิกิริยาทางเคมีของคอนกรีตผสมซีเมนต์

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ในระยะเวลาแรกที่ผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ ซีเมนต์เพสต์จะอยู่ในสภาพเหลวและจะค่อย ๆ สูญเสียความชื้นเหลวไปตามเวลา เมื่อเวลาผ่านไป 2-3 ชั่วโมง ซีเมนต์เพสต์จะเริ่มแข็งตัวในอัตราที่เร็วขึ้นซึ่งเรียกกระยะเวลานี้ว่า เวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial Set) อย่างไรก็ตามซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังน้อยมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปอีก 2-3 ชั่วโมงต่อจากนั้น กำลังของซีเมนต์เพสต์จะเพิ่มขึ้นซึ่งเรียกกระยะเวลานี้ว่า เวลาก่อตัวสุดท้าย (Final Set) อัตราการเพิ่มของกำลังจะเพิ่มอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 1-2 วัน และจะมีอัตราเกือบจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 2-3 เดือน

ในขณะที่เริ่มผสมซีเมนต์เพส อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน หลังจากนั้น 2-3 นาที อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วและคงที่อยู่ประมาณ 2-3 ชั่วโมง เรียกว่า ระยะพักตัว (Dormant Period) หลังจากผ่านช่วงเวลานี้ไปแล้ว คอนกรีตจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งและจะเริ่มแข็งตัว หลังจากเวลาผ่านไปสุดท้ายซีเมนต์เพสจะมีอุณหภูมิลดลงอีกครั้งหนึ่ง ในบางครั้งหลังจากผสม 2-3 วัน คอนกรีตอาจจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย

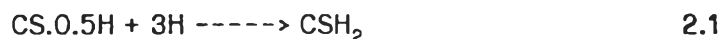
ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์จะมีผลอย่างมากต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์จะประกอบไปด้วย

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ หรือ C_3S
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ หรือ C_2S
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ หรือ C_3A
4. เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ หรือ C_4AF

โดยที่

- C = CaO (Lime)
 S = SiO₂ (Silica)
 A = Al₂O₃ (Alumina)
 F = Fe₂O₃ (Iron Oxide)
 H = H₂O
 CH = Ca(OH)₂

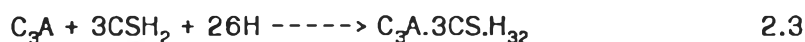
ในขณะที่เริ่มผสมซีเมนต์กับน้ำจะเกิดปฏิกิริยา Rehydration ของ Calcium Sulphate Hemihydrate ซึ่งเกิดมาจากการสลายตัว (Decomposition) ของยิปซัม โดยจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



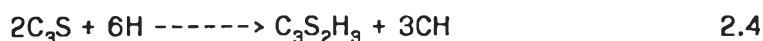
นอกจากปฏิกิริยาของยิปซัมแล้ว ในช่วงเวลาเริ่มต้นของการผสม ยังมีปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Free Lime, (CaO_{free}) และปฏิกิริยาของอลูมิเนต โดยไตรแคลเซียมอลูมิเนต C₃A จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วในเวลาเพียง 2-3 นาที ดังแสดงในสมการที่ 2.2



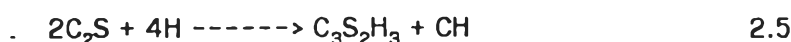
ดังนั้นจึงต้องใส่ยิปซัมเพื่อเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยาเคมีของ C₃A โดยยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C₃A และน้ำ ทำให้ได้ Calcium Sulphoaluminate หรือเรียกว่า Ettringite ดังสมการที่ 2.3



ไตรแคลเซียมซิลิเกต, C_3S เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะทำให้คอนกรีตเริ่มก่อตัว เกิดสาร Tricalcium Disilicate Hydrate ซึ่งเป็นสารที่เพิ่มกำลังในซีเมนต์เพสและสาร Calcium Hydroxide ส่งผลทำให้คุณสมบัติสูงขึ้นดังสมการที่ 2.4



ไตรแคลเซียมซิลิเกต, C_2S จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ เป็นไปตามสมการที่ 2.5



โดยปกติแล้วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วขึ้น ถึงแม้ว่าจะลดอุณหภูมิลงเหลือ $0^\circ C$ ปฏิกิริยาไฮเดรชันก็ยังคงสามารถเกิดขึ้นได้ แต่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในอุณหภูมิต่ำกว่า $-10^\circ C$

2.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

สารปอซโซลานหมายถึงสารที่ประกอบไปด้วย SiO_2 และตัวเองไม่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน (Cementitious) แต่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีก่อให้เกิดสารเชื่อมประสานได้

เมื่อผสมสารปอซโซลานในซีเมนต์ สารปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังแสดงในสมการที่ 2.6



สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ไม่สามารถแบ่งได้อย่างชัดเจนจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทั้งที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและไฮเดรชัน จะส่งผลทำให้กำลังอัดของซีเมนต์สูงขึ้น

2.3 การนำซีเมนต์ลอยมาผสมในคอนกรีต

การนำซีเมนต์ลอยมาผสมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

2.3.1 การแทนที่ (Replacement Method)

เป็นการผสมซีเมนต์ลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตโดยอาจจะทำได้โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก การแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนักจะได้คอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่าการแทนที่ซีเมนต์โดยปริมาตรและเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่ได้จากซีเมนต์ล้วนพบว่ากำลังอัดของ

คอนกรีตผสมซีเมนต์ลอยแบบแทนที่จะมีแนวโน้มที่ต่ำกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากซีเมนต์ล้วน

2.3.2 การผสมเพิ่ม (Addition Method)

การผสมซีเมนต์ลอยในคอนกรีตโดยวิธีผสมเพิ่มจะผสมซีเมนต์ลอยในคอนกรีตโดยใช้ปริมาณซีเมนต์เท่าเดิม โดยที่การผสมซีเมนต์ลอยในซีเมนต์ในลักษณะนี้จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีแต่ซีเมนต์ล้วน เนื่องจากการเพิ่มอนุภาคละเอียดและเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซีเมนต์ลอย

2.3.3 การแทนที่และผสมเพิ่มรวมกัน (Replacement-Addition Method)

เป็นการใช้ซีเมนต์ลอยผสมในคอนกรีต โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ลอยผสมเพิ่มในปริมาณที่มากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงเพื่อลดราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตให้ถูกลง และเพื่อเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานิกในคอนกรีต

ปริมาณของซีเมนต์ลอยที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจะถูกกำหนดโดยกำลังอัดที่ต้องการ, ราคาและความคงตัวของคอนกรีต โดย ACI Committee 226 ได้เสนอปริมาณที่เหมาะสมทางด้านราคาของซีเมนต์ลอยที่ผสมในคอนกรีต โดยได้กำหนดไว้ว่าซีเมนต์ลอย Class F ปริมาณการผสมแบบแทนที่เท่ากับ 15-25 % สำหรับ Class C เท่ากับ 15-35 % ส่วน ACI Committee 211 ได้กำหนดปริมาณของซีเมนต์ลอยที่ผสมในคอนกรีต สำหรับ Class F 15-25 % สำหรับ Class C เท่ากับ 20-35 % สำหรับ ASTM C-618 ได้กำหนดไม่ให้อาศัยปริมาณซีเมนต์ลอยแทนที่ในซีเมนต์เกิน 20 % สำหรับซีเมนต์ลอย Class C และถ้าทดสอบโดยการอบด้วยไอน้ำที่ความดันสูง (Autoclave) จะสามารถแทนที่ซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ลอยได้สูงถึง 45 % ⁽²⁵⁾

2.4 อิทธิพลของซีเมนต์ลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด

2.4.1 ความสามารถในการเทได้ (Workability)

การผสมซีเมนต์ลอยในคอนกรีตจะทำให้ความสามารถในการเทได้ดีขึ้น โดยจะเพิ่มค่าความยุบตัว (Slump) และค่าการไหล (Flow) ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคของซีเมนต์ลอยมีลักษณะกลม ผิวเรียบและเล็กกว่าซีเมนต์มาก จึงส่งผลทำให้ความไหลลื่นของเพสตีชัน และสามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตเมื่อต้องการความสามารถเทได้ที่เท่าเดิมเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา

2.4.2 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

เมื่อผสมซีเมนต์ลอยในคอนกรีตจะสามารถหน่วงระยะเวลาการก่อตัวได้ เนื่องมาจากซีเมนต์ลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S ในช่วงแรก ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสม, ความละเอียด, องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ลอย, ความละเอียดของซีเมนต์, ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมและอุณหภูมิขณะก่อตัว ถ้าระยะเวลาการก่อตัวมากขึ้น จะส่งผลให้มีเวลาในการทำงานมากขึ้นด้วย

2.4.3 ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)

เนื่องจากซีเมนต์ปล่อยความร้อนปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกของการก่อตัว ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาในคอนกรีตจึงเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเกิดขึ้นน้อยด้วย

2.4.4 การเยิ้ม (Bleeding)

เนื่องจากการผสมซีเมนต์จะทำให้ปริมาณอนุภาคละเอียดมากขึ้น สามารถอุดช่องว่างโดยแทนที่ช่องว่างที่เป็นน้ำในคอนกรีต และสามารถลดน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเนื่องจากอนุภาคซีเมนต์มีลักษณะกลม ทำให้เกิดการไหลลื่นที่ดี ส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น

2.4.5 แรงยึดเหนี่ยวและการแยกตัว (Cohesion and Segregation)

ซีเมนต์จะอุดช่องว่างในคอนกรีตทำให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ส่งผลทำให้เนื้อคอนกรีตมีการยึดเหนี่ยวที่ดีขึ้น สามารถลดการแยกตัว และทำให้ฟองอากาศในคอนกรีตมีน้อยลง

2.5 อิทธิพลของซีเมนต์ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็ง

2.5.1 กำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซีเมนต์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของซีเมนต์, สัดส่วนผสมของคอนกรีต, คุณสมบัติของมวลรวม, ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต และการบ่มคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตผสมซีเมนต์โดยวิธีการแทนที่ซีเมนต์จะให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาในระยะเริ่มแรก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ใช้แทนที่ซีเมนต์และคุณสมบัติของซีเมนต์ ซึ่งกำลังอัดในช่วงแรกของคอนกรีตผสมซีเมนต์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากที่อายุเริ่มแรกนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังไม่เกิดหรือเกิดขึ้นน้อย ไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ลดน้อยลง

ในระยะแรกของคอนกรีตผสมซีเมนต์ (1-2 สัปดาห์) ปฏิกิริยาของซีเมนต์ในคอนกรีตยังไม่เกิดขึ้นเนื่องจากซีเมนต์ยังอยู่ในสภาวะฟักตัว (Incubation Period)⁽¹⁵⁾ ในสภาวะนี้ซีเมนต์จะทำหน้าที่เป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) เนื่องจากในสภาวะนี้ความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำในช่องว่างยังไม่สามารถละลาย Glass Phase ของซีเมนต์ได้ หลังจากที่เป็นด่างของน้ำในช่องว่างมีความเข้มข้นจนสามารถละลาย Glass Phase ได้แล้ว ปฏิกิริยาของคอนกรีตผสมซีเมนต์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้น

2.5.2 โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

โมดูลัสความยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต นั่นคือค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามเวลา และจากการศึกษาพบว่าลักษณะของซีเมนต์และมวลรวมจะมีผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมากกว่าลักษณะของซีเมนต์

2.5.3 ช่องว่างในคอนกรีต (Void)

เนื่องจากซีเมนต์จะดูดช่องว่างในคอนกรีตเมื่ออยู่ในสภาพสด ส่งผลทำให้เพสแน่นขึ้น ดังนั้นเมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะทำให้ขนาดของช่องว่างในเพสลดน้อยลง และทำให้การซึมผ่านของอากาศและน้ำเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงสามารถต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กในโครงสร้างและการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้ดี

2.5.4 การหดตัวของซีเมนต์ผสมซีเมนต์ในสภาพแข็ง (Shrinkage)

การสูญเสียน้ำของซีเมนต์เพสในสภาวะปกติก่อให้เกิดการหดตัว การหดตัวของซีเมนต์เพสขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม, ขนาดของมวลรวม, ปริมาณซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ใช้ผสม การสูญเสียน้ำส่วนที่เป็น Free Water ไม่ส่งผลทำให้เกิดการหดตัวของซีเมนต์เพส แต่หลังจากที่น้ำส่วนที่เป็น Adsorbed Water ระเหยไป ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปของซีเมนต์เพสสามารถประมาณได้เท่ากับความหนาของน้ำ 1 โมเลกุล ที่อยู่บริเวณผิวของซีเมนต์ส่วนที่ทำปฏิกิริยา

2.6 การหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสผสมซีเมนต์

การหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โดยวิธี Thermogravimetry Analysis, (TGA) เพื่อใช้อธิบายอัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีความถูกต้องน่าเชื่อถือมากกว่าวิธีอื่น ๆ ⁽¹⁷⁾ หลักการคือหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการสลายตัวของซีเมนต์เพสผสมซีเมนต์เมื่อถูกเผาด้วยความร้อน (Decomposition) ไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และน้ำ (H_2O) ซึ่งสามารถหาน้ำหนักของน้ำได้จากน้ำหนักที่สูญเสียไป (Weight Loss) ในช่วงอุณหภูมิประมาณระหว่าง $450-600^\circ\text{C}$ แล้วคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้

2.6.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เมื่อน้ำซีเมนต์มาผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) และปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

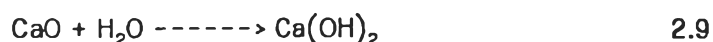


ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีไตรแคลเซียมซิลิเกตอยู่ในปริมาณ 52 % และไดแคลเซียมซิลิเกตในปริมาณ 20 % จากการคำนวณโดยวิธีทางเคมีโดยใช้สมการที่ 2.7 และ 2.8 สามารถคำนวณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากไตรแคลเซียมซิลิเกตได้เท่ากับ 25.3 % และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากไดแคลเซียมซิลิเกตเท่ากับ 4.3 % และ

คำนวณหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้น เนื่องจากไตรแคลเซียมซิลิเกตได้เท่ากับ 39 % และจะเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเนื่องจากไดแคลเซียมซิลิเกตปริมาณเท่ากับ 19.9 %

2.6.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

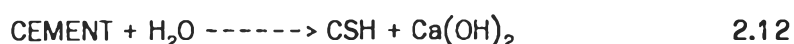
เมื่อน้ำซีเมนต์ละลายผสมในซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกดังสมการที่ 2.9, 2.10 และ 2.11 ดังนี้



เมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก CaO ในซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ SiO₂ และ Al₂O₃ ในซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมซีเมนต์ละลายในซีเมนต์ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มทั้งเพิ่มและลดในเวลาเดียวกันและไม่สามารถแบ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกันได้อย่างชัดเจน ซึ่งปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถทดสอบหาได้ด้วยวิธี Thermogravimetry Analysis

2.6.3 โครงสร้างของซีเมนต์เฟสในสภาพแข็ง (Harden Cement Paste)

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ (ปฏิกิริยาไฮเดรชัน) จะเป็นไปดังสมการที่ 2.12



เป็นที่ทราบกันดีว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เป็นสารที่เพิ่มกำลังของคอนกรีต ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเป็นสารที่เหลือนแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของซีเมนต์เฟส ดังนั้นโครงสร้างของซีเมนต์เฟสในสภาพแข็งจะประกอบไปด้วย

1. ซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ (Unhydrated Cement)
2. ซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำและมีน้ำเป็นส่วนประกอบ (Hydrated Cement) ซีเมนต์ในส่วนนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอลูมิเนตและอื่นๆดังหัวข้อที่ 2.2
3. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เป็นสารที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างของซีเมนต์เฟส
4. ช่องว่างในซีเมนต์เฟสเรียกว่า Capillary Pore

ถ้ามีปริมาณน้ำเพียงพอในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของ CSH และแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ถ้ามีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงดังหัวข้อที่ 2.2.2 และถ้าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) น้อยจะทำให้ขาดน้ำในการทำปฏิกิริยา ส่งผลทำให้ซีเมนต์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ และปฏิกิริยาจะหยุดเมื่อช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ถูกเติมเต็มด้วย CSH และแคลเซียมไฮดรอกไซด์

2.6.4 ประเภทของน้ำในซีเมนต์เพสต์ภาวะแข็ง

ซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาวะแข็งจะประกอบไปด้วยสารต่าง ๆ ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ การสูญเสียน้ำในซีเมนต์เพสต์จะส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการหดตัว (Shrinkage) น้ำในซีเมนต์เพสต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทตามความยากง่ายในการกำจัดน้ำออกไป ดังนี้

1. น้ำที่สามารถระเหยได้ง่าย (Water Vapour) จะเป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่ของซีเมนต์เพสต์ น้ำประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิ
2. น้ำคาพิลลารี (Capillary Water) น้ำชนิดนี้จะอยู่ในช่องว่างขนาดเล็ก (Capillary Pore) ที่มีขนาดประมาณ 5 nm. โดยที่ถ้าน้ำในช่องว่างที่มีขนาดเล็กกว่า 50 nm. ถูกทำให้ระเหยไป อาจส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัวได้
3. น้ำที่ถูกดูดซึม (Adsorbed Water) เป็นน้ำที่อยู่ติดกับส่วนที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะถูกยึดไว้ด้วยแรงจากผิวของของแข็ง น้ำในส่วนนี้จะเรียงตัวกันไม่เกิน 5 โมเลกุล (ความหนาแน่นไม่เกิน 1.3 nm.) ซึ่งน้ำส่วนที่เกินกว่านี้จะระเหยไปเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าน้อยกว่า 30 % การสูญเสียน้ำในส่วนนี้จะป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว (Shrinkage)
4. น้ำระหว่างชั้น (Interlayer Water) น้ำส่วนนี้จะอยู่ใน Gel Pore ของซีเมนต์เพสต์ (มีขนาดเล็กกว่า 2.6 nm.) โดยน้ำในส่วนนี้จะถูกยึดไว้อย่างแข็งแรงโดยผิวของของแข็งในช่องว่าง การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้ความร้อนสูง
5. น้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Chemically Combined Water) น้ำในส่วนนี้จะถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000°C เพื่อให้ซีเมนต์เพสต์และน้ำสลายตัวไปเป็นสารอื่นหรือที่เรียกว่าการสลายตัวของสาร (Decomposition)

2.6.5 หลักการของวิธี Thermogravimetry Analysis (TGA)

เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิระหว่าง 100-400 °C ปริมาณน้ำประเภทต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์จะระเหยไป แต่เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (400-1,000°C) สารประกอบต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวไปเป็นสารประกอบอื่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำลงหรือเป็นธาตุ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยที่อุณหภูมิระหว่าง 450-600°C แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวไปเป็นแคลเซียมออกไซด์และน้ำ และเมื่อน้ำส่วนนี้ ที่ได้จากการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกความร้อนจะระเหยไป ทำให้น้ำหนักทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ลดลง น้ำหนักส่วนนี้สามารถวัดได้โดยตรงด้วยวิธี TGA แล้วทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ โดยวิธีการคำนวณทางเคมี

ในการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวอย่างจะถูกเผาด้วยอัตราความร้อน 10 °C/นาท โดยเริ่มเผาจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 650°C ในบรรยากาศของไนโตรเจน เพื่อป้องกันซีเมนต์เพสต์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเมื่อถูกเผาด้วยอุณหภูมิสูง โดยในขณะ

ที่ทำการเผาจะวัดน้ำหนักของตัวอย่างไปด้วย เครื่องจะบันทึกน้ำหนักที่หายไป คำนวณเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารเริ่มต้นและทำการวัดพลังงานของสารเมื่อถูกเผาด้วยความร้อน ดังนั้นผลที่ได้จากการทดสอบจะประกอบไปด้วย

1. น้ำหนักที่หายไปเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเริ่มต้น (Weight Loss)

เมื่อซีเมนต์เฟสที่อุณหภูมิประมาณ 450-600 °C แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสลายตัว (Decomposition) ไปเป็นแคลเซียมออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ 2.13



เมื่อน้ำที่ได้จากการสลายตัวถูกเผาด้วยความร้อน จะระเหยออกไปทำให้น้ำหนักของสารทั้งหมดลดลง เรียกน้ำหนักที่หายไปนี้ว่า Weight Loss ซึ่งเครื่อง TG จะแสดงผลออกมาเป็นกราฟระหว่างอุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป เรียกว่า TG Curve

2. อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลา (d(TG)/dt)

เป็นการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (ในทางคณิตศาสตร์) ของเส้น TG Curve จะแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับเวลา และบ่งบอกถึงช่วงของอุณหภูมิที่น้ำหนักเริ่มหายไป ดังจะแสดงเป็นช่วงของอุณหภูมิที่สูงสุด (Peak Temperature)

3. ความแตกต่างของพลังงานที่ใช้เทียบกับสสารมาตรฐาน (DSC)

เมื่อซีเมนต์เฟสได้รับความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ส่งผลทำให้ซีเมนต์เฟสคายหรือดูดความร้อนเข้าไปในตัวเอง สามารถวัดค่าออกมาได้เป็น DSC Curve ซึ่ง DSC Curve สามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิเริ่มต้นที่ซีเมนต์เฟสเริ่มทำปฏิกิริยาได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.3 แสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี

Peak	Temp (°C)	Reaction
1	100	Dehydration of pore water
2	180	Dehydration of CSH
3	350	Dehydration of CSH
4	400	Dehydration of CSH
5	600	Dehydroxylation of Ca(OH) ₂
6	780	Decarbonation of CaCO ₃

หลังจากที่นำซีเมนต์เฟสไปเผาจนอุณหภูมิสูงถึง 650°C ผลที่ได้จากการทดสอบจะวัดออกมาเป็นน้ำหนักทั้งหมดที่หายไป แสดงผลเป็นเส้น TG Curve นำผลที่ได้มาหาอัตราการ

เปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลา ($d(TG)/dt$) โดยการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (ในทางคณิตศาสตร์) ของเส้น TG Curve จะได้กราฟที่แสดงถึงช่วงของอุณหภูมิที่น้ำหนักหายไป

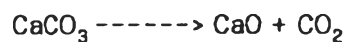
จากกราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลา ($d(TG)/dt$) สามารถแบ่งช่วงของอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาได้ 6 ช่วง ดังตารางที่ 2.3 พีค (Peak) ต่าง ๆ แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของซีเมนต์เฟส พีคที่ 2 และ 4 จะไม่ปรากฏชัด เนื่องจากอยู่ใกล้กับพีคที่ 1 และ 3 ซึ่งพีคต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

พีคที่ 1 - 4

อุณหภูมิในส่วนนี้จะเป็นการระเหยน้ำชนิดต่าง ๆ ของซีเมนต์เฟส ซึ่งน้ำแต่ละชนิดที่ระเหยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำการเผา โดยที่อุณหภูมิประมาณ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ น้ำส่วนที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่สามารถระเหยไปดังแสดงเป็นพีคที่ 1 หลังจากนั้นถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นไปอีก (ประมาณ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$) น้ำส่วนที่เป็น Capillary Pore Water ที่อยู่ในโครงสร้างของ CSH จะถูกทำให้ระเหยไป ส่งผลทำให้เกิดพีคที่ 2 เมื่อเผาจนอุณหภูมิสูงถึง $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ น้ำส่วนที่ถูกดูดซึมไว้ (Adsorbed Water) จะถูกทำให้ระเหยไปดังแสดงเป็นพีคที่ 3 น้ำในส่วนของ Interlayer Water จะถูกระเหยไปเมื่อเผาจนอุณหภูมิสูงถึง $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังปรากฏเป็นพีคที่ 4

พีคที่ 5 - 6

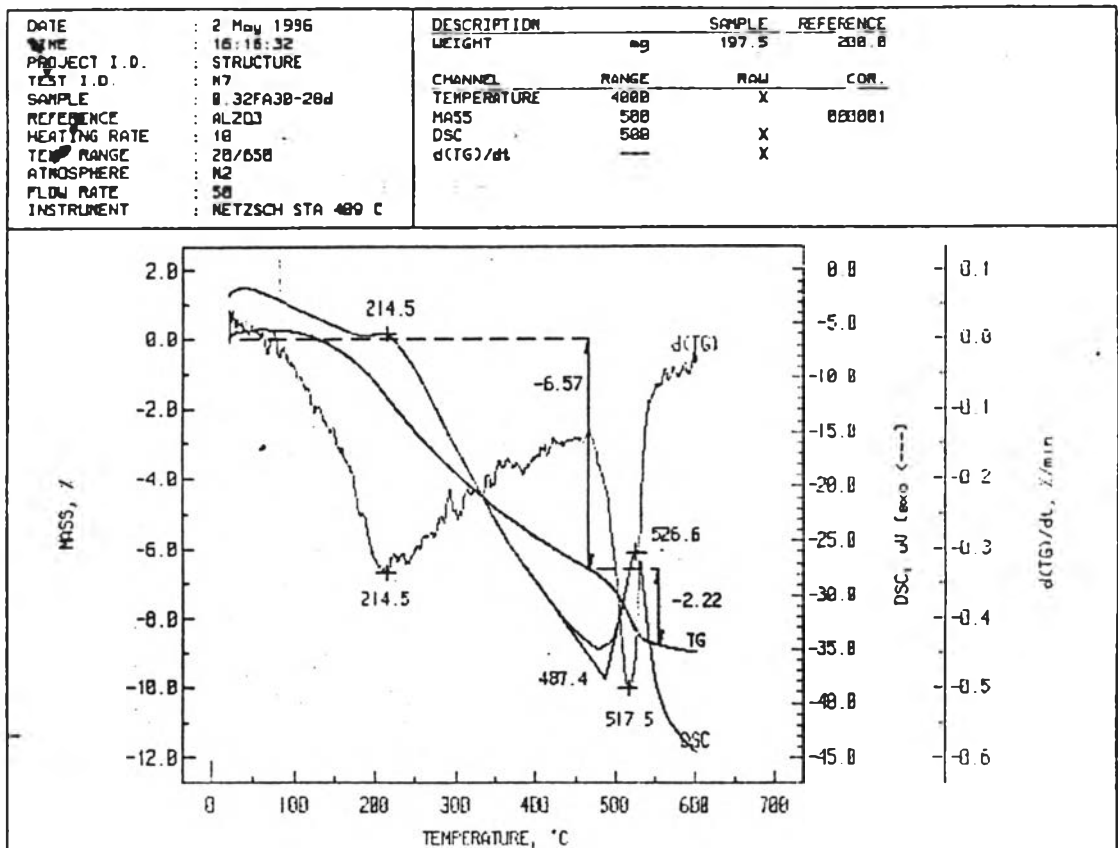
หลังจากที่น้ำประเภทต่าง ๆ ในช่องว่างถูกระเหยไป น้ำที่เหลือจากส่วนนี้จะถูกกำจัดไปโดยขบวนการสลายตัวของซีเมนต์เฟส (Decomposition) เมื่อเผาด้วยความร้อนสูง โดยถ้าเผาจนอุณหภูมิสูงถึงประมาณ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เฟสจะสลายตัวไปเป็นแคลเซียมออกไซด์และน้ำ โดยน้ำส่วนที่ได้จากการสลายตัวนี้ เมื่อสัมผัสกับความร้อนสูงก็จะระเหยไปซึ่งจะปรากฏเป็นพีคที่ 5 นั่นคือน้ำหนักที่ลดลง แสดงเป็นเส้น TG ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $450\text{-}600^{\circ}\text{C}$ โดยที่ปริมาณน้ำที่ถูกระเหยออกไปส่วนนี้ สามารถวัดได้โดยวิธี TGA หลังจากนั้นก็สามารถคำนวณย้อนกลับไปหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้โดยการคำนวณทางเคมี ถ้าเพิ่มความร้อนให้สูงขึ้นไปอีกจนถึงประมาณ $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะปรากฏพีคที่ 6 อันเนื่องมาจากปฏิกิริยา Decarbonation ของแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการที่ 2.14



2.14

2.6.6 การวิเคราะห์และประเมินค่า

ผลที่ได้จากการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธี TGA จะรายงานผลออกมาเป็น TG Curve และ DSC Curve ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่ TG Curve เป็นกราฟที่แสดงถึงน้ำหนักที่หายไปในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสารทั้งหมดก่อนการทดสอบ โดยที่สารชนิดต่างกันจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิต่างกัน จากการวิจัยของ Midgley⁽¹⁷⁾ และ Ramachandran⁽¹⁸⁾ พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดจากการสลายตัวไปเป็นแคลเซียมออกไซด์และน้ำเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิระหว่าง $450\text{-}600^{\circ}\text{C}$ ดัง



รูปที่ 2.3 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี TGA

แสดงในสมการที่ 2.13 เมื่อน้ำที่ได้จากขบวนการสลายตัวถูกความร้อน จะระเหยไปทำให้น้ำหนักทั้งหมดลดลง ซึ่งสามารถวัดปริมาณน้ำส่วนนี้ได้ แล้วทำการคำนวณหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากน้ำส่วนนี้โดยใช้สมการที่ 2.13 ซึ่งจากการคำนวณพบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สลายตัวไปมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำที่วัดได้คูณด้วยค่าคงที่เท่ากับ 4.11

การหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของกราฟ TG Curve ($d(TG/dt)$) จะแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเทียบกับเวลาและจะบ่งบอกถึงช่วงของอุณหภูมิที่น้ำหนักเริ่มหายไป ส่วน DSC Curve เป็นกราฟที่บ่งบอกถึงความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทางเคมี และสามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิเริ่มต้นที่ซีเมนต์เฟสเริ่มทำปฏิกิริยาได้

2.7 การหาค่าปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดในซีเมนต์ผสมซีเมนต์ฉ่ำลอย

เมื่อน้ำซีเมนต์มาผสมกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่เนื่องจากสารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตไม่สามารถทำการทดสอบหาได้โดยตรง จึงต้องทำการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วคำนวณย้อนกลับไปหาแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ซึ่งการคำนวณหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์ผสมซีเมนต์ฉ่ำลอย Rison⁽²⁶⁾ ได้เสนอวิธีคำนวณและข้อสมมุติฐานในการคำนวณหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตดังนี้

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จะประกอบไปด้วยไตรแคลเซียมซิลิเกตปริมาณ 52 % และไดแคลเซียมซิลิเกตปริมาณ 20 % ซึ่งปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดเนื่องจากสาร 2 ชนิดนี้เท่านั้น

2. สารที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรชันของซีเมนต์ จะประกอบไปด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต, (CSH) ซึ่งสารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต สามารถประมาณได้ดังสูตร $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$

3. สารประกอบในซีเมนต์ฉ่ำลอยที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับซีเมนต์ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ คือสารซิลิกอนไดออกไซด์, (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์, (CaO) เท่านั้น

4. ในการคำนวณ จะเป็นการหาแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เกิดขึ้น ซึ่งจะไม่รวมผลที่เกิดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอลูมิโน-ซิลิเกต (ได้สารแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต, CAH) ในซีเมนต์ฉ่ำลอย

ปฏิกิริยาไฮดรชันของซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาไฮดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต, (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต, (C_2S) ดังสมการที่ 2.15 และ 2.16 ดังนี้

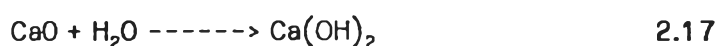


โดยที่สารต่าง ๆ มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight, MW.) ดังนี้

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	มี MW. = 228
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	มี MW. = 172
$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	มี MW. = 342
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	มี MW. = 74
H_2O	มี MW. = 18

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จะมีไตรแคลเซียมซิลิเกตปริมาณ 52 % และ ไดแคลเซียมซิลิเกตปริมาณ 20 % ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ โดยใช้สมการที่ 2.15 และ 2.16 ซึ่งปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากไตรแคลเซียมซิลิเกตมีปริมาณเท่ากับ 39 % และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากไดแคลเซียมซิลิเกตมีปริมาณเท่ากับ 19.9 %

เมื่อผสมซีเมนต์ลงในปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเป็นไปดังสมการที่ 2.17 และสมการที่ 2.18 ดังนี้



โดยที่

CaO มี MW. = 56

SiO_2 มี MW. = 60

ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถคำนวณได้จากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเปรียบเทียบกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความแตกต่างของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะบ่งบอกถึงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ได้โดยใช้สมการที่ 2.17 และ 2.18 ดังแสดงวิธีการคำนวณในหัวข้อที่ 4.3