

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

ในงานด้านวิศวกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอุปกรณ์ก่อสร้างที่สำคัญซึ่งมีราคาแพง ถ้าเราสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง โดยให้คุณสมบัติทางด้านกำลังคงเดิมก็จะเป็นการประหยัดที่ดี ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาจึงมีผู้สนใจในวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ (Pozzolan) เช่นขี้เถ้าลอย จากถ่านหินและขี้เถ้าแกลบ จากการเผาแกลบ ซึ่งวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นวัสดุที่เหลือใช้ตามธรรมชาติ และหาได้ไม่ยากนัก ดังนั้นคณะผู้จัดทำโครงการจึงได้ทำการศึกษาว่าจะสามารถนำเอาวัสดุ Pozzolan เหล่านี้มาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตร่วมกับปูนซีเมนต์ได้หรือไม่และคุณสมบัติที่ได้เป็นอย่างไร ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับโครงการ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

- ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ทำการโครงการ
- ส่วนประกอบทางเคมีโดยเปรียบเทียบ
- ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan)

#### 2.1 ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ทำการวิจัย

~~2.1.1~~ **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์** ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในทางวิศวกรรม โดยเมื่อผสมกับหิน ทราย และน้ำ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้คอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งแรงทนทานคล้ายหินปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากการเผาส่วนผสมต่างๆที่อุณหภูมิประมาณ 1400 ถึง 1500 องศาเซลเซียส

2.1.1.1 วัสดุดิบ วัสดุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแบ่งได้ 2 ประเภทคือ ประเภทที่ 1 ให้ธาตุแคลเซียม ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว ประเภทที่ 2 ให้ธาตุซิลิกาและอลูมินา ได้แก่ หินเชล ดินเหนียว และหินชนวน

2.1.1.2 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อเผาส่วนผสมของปูนซีเมนต์แล้วสารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกา อลูมินาและเหล็ก จะทำปฏิกิริยาเคมีรวมตัวกันได้สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังตารางที่ 2.1

### ตารางที่ 2.1 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

2.1.1.3 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากจำนวนของสารประกอบจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์แล้ว ชนิดของสารประกอบก็เป็นตัวสำคัญที่กำหนดคุณลักษณะต่างๆของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังนี้

ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( Tricalcium Silicate ,  $\text{C}_3\text{S}$  ) จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้เร็วให้กำลังสูงและเกิดความร้อนมาก การเพิ่มปริมาณจะทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสภาพพลาสติกมากขึ้น และช่วยหน่วงเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ช้าลง

ไดแคลเซียมซิลิเกต ( Dicalcium Silicate ,  $\text{C}_2\text{S}$  ) จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้า ให้กำลังสูงและเกิดความร้อนน้อย การเพิ่มปริมาณจะได้ผลหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บ้างเล็กน้อย

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( Tricalcium Aluminate ,  $\text{C}_3\text{A}$  ) จะก่อตัวกันทันทีผสมกับน้ำให้ความร้อนสูง จะทำให้กำลังรับแรงเล็กน้อยในวันแรกๆ และจะไม่ทำให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่จะมีประโยชน์คือ ช่วยเร่งปฏิกิริยาของไดแคลเซียมซิลิเกต

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( Tetracalcium Aluminoferrite ,  $\text{C}_4\text{AF}$  ) จะก่อตัวอย่างรวดเร็วแต่ช้ากว่าและให้ความร้อนน้อยกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนตเล็กน้อย

ในปูนซีเมนต์จะมี สารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_2\text{S}$ ) รวมประมาณ 70-80 % และเป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1.1.4 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีส่วนประกอบที่สำคัญคือแคลเซียม (  $\text{CaO}$  ) ประมาณ 60 % และซิลิกา (  $\text{SiO}_2$  ) ประมาณ 20 % ซึ่งทั้งสองธาตุนี้เป็นสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของไดแคลเซียมซิลิเกตและไตรแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งจะให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กำลังได้สูง

**2.1.2 จีเถ้าแกลบ** คือ จีเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ของแกลบ จีเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้ในลักษณะต่างกันบ้าง เช่น ถ้าเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีข้าว เป็นการเผาที่ใช้เวลาน้อยอุณหภูมิไม่สูงมากนักจะได้จีเถ้าที่เป็นสีดำเป็นส่วนใหญ่เพราะมีส่วนประกอบของคาร์บอนสูง มีขนาดใหญ่มีคุณสมบัติในการพัฒนากำลังเมื่อผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่ำ แต่ถ้าการเผาไหม้ใช้ในการควบคุมหรือใช้อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาไหม้นานพอ เราจะได้จีเถ้าแกลบที่มีลักษณะดี มีสีขาว ปริมาณคาร์บอนต่ำ และคุณสมบัติในการพัฒนากำลังเมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดีขึ้น

2.1.2.1 วัตถุประสงค์ วัตถุประสงค์คือ แกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกปกติ

2.1.2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของจีเถ้าแกลบมีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) สูงมาก คือ ประมาณ 90 % แคลเซียม ( $\text{CaO}$ ) ต่ำมาก ไม่ถึง 1 % และที่สำคัญมากก็คือเกือบไม่มีอนุโมลซัลเฟต ( $\text{SO}_3$ ) เลย

2.1.2.3 อิทธิพลของจีเถ้าแกลบต่อการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จีเถ้าแกลบมีลักษณะการเกิดและส่วนประกอบทางเคมีคล้ายจีเถ้าลอย และเป็นสารปอซโซลานอย่างหนึ่ง (Pozzolan) โดยซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ในจีเถ้าแกลบสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ในน้ำปูน

### การใช้ประโยชน์จากแกลบ

การใช้แกลบให้เกิดประโยชน์ ได้รับความสนใจมานานหลายทศวรรษแล้ว เป็นผลให้มีการตีพิมพ์เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง โดยแบ่งการใช้ประโยชน์ออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

#### 1. ทางด้านเกษตรกรรม

- ใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ เช่น เป็ด ไก่ วัว ควาย เพื่อลดต้นทุน
- ปูรองให้สัตว์พวกเป็ด ไก่ นอน เป็นการใช้ประโยชน์ที่เก่าแก่ที่สุด
- จากข้อมูลการวิเคราะห์แกลบพบว่ามีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยได้เพียงเล็กน้อย

เท่านั้น แต่เมื่อปล่อยให้แกลบถูกย่อยสลายในดินจะทำให้ดินมีฟอสฟอรัสมากขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มการนำซิลิก้าขึ้นไปโดยพืช ซึ่งจะช่วยในการต้านทานแมลง

- ได้มีการใช้แกลบเป็นตัวค้ำจุนสำหรับพืชที่กำลังเจริญเติบโต โดยเทคนิคที่ไม่ต้องอาศัยดินที่เรียกว่า ไฮโดรพอนิกส์ (hydroponics) สารอาหารที่จำเป็นจะอยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งยังคงมีใช้ในวงจำกัดและแกลบจำเป็นต้องได้รับวิธีปฏิบัติที่เหมาะสม

## 2. ทางด้านอุตสาหกรรม

### - เป็นเชื้อเพลิง

ในการสีข้าวสำหรับโรงสี ในการทำให้เกิดลมร้อนสำหรับเป่าข้าวเปลือกให้แห้ง ก่อนที่จะนำไปเก็บและนำไปสี แกลบมีค่าความร้อน 1000 - 1600 แคลอรีและจากการคำนวณพบว่ากำลัง 1 แรงม้า ต้องการแกลบ 1.8-2.4 กก. นอกจากนี้ยังใช้แกลบอัดเป็นฟืนสำหรับเตาฟิงในวิธีเดียวกันกับการทำจากเศษไม้ ค่าความร้อนที่ได้เป็นค่าความร้อนที่ได้เป็น 6113 บีทียู/ปอนด์ สำหรับแกลบ และสำหรับไม้ประมาณ 8450 บีทียู/ปอนด์

### - คาร์บอนไนเซชัน(carbonization)

การกลั่นแห้งหรือคาร์บอนไนเซชันของแกลบ คือ การให้ความร้อนในปริมาณที่จำกัดหรืออากาศไม่เพียงพอ ซึ่งให้คาร์บอนละเอียดน้ำหนักเบา ของเหลวที่มีลักษณะเหมือนน้ำมันดินและแก๊ส กระบวนการนี้ได้รับความสนใจอย่างมากในสหรัฐอเมริกาในการผลิต (นอกเหนือจากถ่าน) เช่น กรดแอสติค เมทานอล แอซิโตน เมทิลเอทิลคีโตน และน้ำมันดิน แต่ความสำคัญของกระบวนการนี้ได้ลดน้อยลงเมื่อสารเคมีสามารถผลิตได้โดยวิธีอื่นที่ถูกลงกว่า

### - ทำเป็นฉนวน

เนื่องจากแกลบ มีค่าการนำไฟฟ้า (k - value) ต่ำจึงเป็นฉนวนที่ดีใช้ทำฝ้าเพดาน แกลบที่นำมาใช้ต้องถูกทำให้ทน น้ำ ไฟ แผลง พบว่า กรดฟอสฟอริก 20 % หรือ กรดบอริกต่อบอแรกซ์ 60:40 ให้ผลที่ดีในการทนไฟ แกลบที่ถูกทำปฏิกิริยาด้วยกรดจะมีค่าการนำไฟฟ้า 0.02 ต่ำกว่าแกลบที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์น้อยลงเนื่องจากมีพอลิยูรีเทนเข้ามาแทนที่

### - ทำเป็นวัสดุก่อสร้าง

เช่น บล็อกคอนกรีต อิฐ กระเบื้องปูพื้น ฯลฯ จุดประสงค์สำคัญ คือ เพื่อทำเป็นอิฐหรือคอนกรีตน้ำหนักเบาและมีสมบัติเป็นฉนวนดีขึ้น ตัวอย่างเช่น บล็อกที่ทำจากซีเมนต์ต่อซีเมนต์แกลบเป็นอัตราส่วน 1:2:1 หนักประมาณ 16 ปอนด์ จะมีความทนแรงดึง (tensile strength) ของซีเมนต์ที่ผลิตได้

### - ทำกระดาษ

นอกจากปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในแกลบจะต่ำกว่าในไม้แล้วเส้นใยยังสั้นเกินไป ทำให้กระดาษที่ได้มีสมบัติไม่ดี และยังมีปัญหาเกี่ยวกับการเอาเพนโทซาน (pentosan เป็นเฮมิเซลลูโลสในแกลบ) และซีลัดที่เหลืออกเพิ่มอีก จึงไม่เป็นที่นิยมในการนำไปใช้เชิงพาณิชย์

### - ทำวัสดุสำหรับขัด

การใช้ประโยชน์นี้แบ่งออกเป็นหลายระดับ คือ

1. เป็นสารขัดถู (tumble-cleaning and polishing agents)
2. เป็นวัสดุสำหรับเป่า (soft-grit blasting materials)
3. เป็นสารขัดในสบู่ถูมือ (abrasives in handsoaps)

จากการทดลองพบว่าเกลบยังคงมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดผิวหน้าของท่อที่ทำด้วยเหล็ก อะลูมิเนียม ทองเหลืองหรือบรอนซ์ เมื่อเพิ่มความเร็วให้สูงขึ้น และยังคงใช้ได้ดีกับการขัดส่วนเล็ก ๆ ที่ทำด้วยพลาสติก เราสามารถใช้เกลบทั้งอันสำหรับเป็นสารขัดถู ถึงแม้ว่าจะมีขนาดเล็กลงระหว่างการใช้อีกก็ตาม

- ใช้เป็นฟิลเลอร์และสารเติมแต่ง
- ใช้เป็นตัวพาและสารดูดซับ
- เป็นแหล่งของซิลิกา

ในเกลบมีซิลิกาประมาณ 20 % ซึ่งเป็น ซิลิกาที่มีคุณภาพดีเนื่องจากมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆต่ำ ซิลิกาจากเกลบต้องแข่งขันกับแหล่งของซิลิกาที่มีราคาถูกอื่นๆ เช่น ทรายเบนโทไนท์ (bentonite) และดินไดอะตอม (diatomaceous earth) แต่ซิลิกาจากเกลบยังคงได้เปรียบเนื่องจากมีปริมาณของธาตุที่ไม่ต้องการต่ำ

#### การใช้ประโยชน์ซีเถ้าจากเกลบ

ซีเถ้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (สีเทา) หรือปราศจากคาร์บอน (ชมพูหรือขาว) สามารถใช้แทนซีเถ้าที่มีคาร์บอนสูง (สีดำ) ได้หลายประการ สิ่งหนึ่งที่ยังคงใช้คือใช้ทำสารขัดถูในเครื่องจักร สบู่ถูมือ เช่นเดียวกับการใช้เกลบบดทำ ดังที่ได้ถึงไปแล้วก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวปรับสภาพดินตลอดไปจนถึง เป็นส่วนประกอบของสารขัดพื้นในยาสีฟัน

##### 1. ใช้ทำเป็นสารดูดและขจัดน้ำมัน

ระหว่างการเผา ผิวหน้าของซิลิกาที่อยู่ในรูปของกรดพอลิซิลิซิก (polysilicic acid) จะถูกดึงเอาน้ำออกบางส่วนและเข้ากันได้ดีกับน้ำมันมากกว่าน้ำจากลักษณะนี้ร่วมกับรูพรุนที่มีอยู่มาก ทำให้ซีเถ้าสามารถดูดซับและเก็บน้ำมันหรือจารบีไว้ได้ในปริมาณมาก ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการใช้เป็นสารกำจัดน้ำมัน ตามสถานีบริการน้ำมัน โรงปฏิบัติการเครื่องจักร เครื่องยนต์ เป็นต้น

## 2. ใช้เป็นตัวพา

เนื่องจากอนุพันธ์ที่มีมากทำให้ซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวพาสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา ยาน้ำแมลง และยาน้ำเชื้อราได้อีกด้วย

## 3. ใช้เป็นสารทำให้ข้น (thickening agent)

## 4. ใช้เป็นสารดูดความชื้น โดยการนำไปผลิตเป็นซิลิกาเจล (precipitated silicic acid)

## 5. ทำวัสดุทนไฟ

นอกจากอนุพันธ์แล้วซีเมนต์ยังมีการต้านทานความร้อนสูงด้วยจึงเหมาะที่จะนำมาเป็นวัสดุทนไฟชนิดต่าง ๆ เช่นมีการผลิตอิฐทนไฟน้ำหนักเบา และแผ่นเซรามิกดูดความชื้นที่มีอนุพันธ์ละเอียด แผ่นนี้ใช้เครื่องให้ความร้อนจากการใช้อากาศร้อน อิฐที่ได้มีความแข็งแรงดี มีปริมาณคงที่ และมีความเป็นฉนวนสูง และไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงในการทำให้มีขนาดหรือรูปร่างตามต้องการ อย่างไรก็ตามตลาดสำหรับอิฐทนไฟนี้ยังคงอยู่ในวงจำกัด

นอกจากนี้ยังมีการนำซีเมนต์ไปใช้ในสถานะที่เป็นแหล่งซิลิกาอีกมากมาย รวมไปถึงการใช้ซีเมนต์ที่ละเอียดเป็นสารช่วยการแขวนลอย (suspension agent) ในพอร์ซีเลนอีนาเมล ซีเมนต์ยังใช้ในการทำแก้วซิลิกา (silica glasses) ชนิดพิเศษหรือทำเป็นแก้วโซดา (soda-lime glasses) ถ้าเกลบนั้นถูกนำไปทำกับต่างก่อนนำมาเผา

กล่าวได้ว่าซีเมนต์ที่มีคาร์บอนต่ำเป็นแหล่งดีเลิศสำหรับก่อนนำมาเผาซิลิกา การไม่มีคาร์บอนและสารอินทรีย์ให้ไม่มีปัญหา เกี่ยวกับสีของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซีเมนต์ที่เหลือจากกระบวนการผลิตซิลิกาคลอไรด์ ก็เหมาะสำหรับการนำมาผลิตซิลิกา

กล่าวโดยสรุปได้ว่า การใช้ประโยชน์จากเกลบนั้นขึ้นกับการพิจารณาทางเศรษฐกิจ สังคม ข้อมูลการตลาด และเทคนิคในการผลิต

## 2.2 ส่วนประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมี

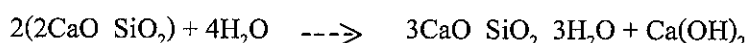
ส่วนประกอบทางเคมี	ส่วนประกอบทางเคมี (%)	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ซีเมนต์แกลบ
SiO <sub>2</sub>	20.20	94.8
CaO	63.82	0.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.42	1.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.92	0.20
MgO	1.50	0.20
K <sub>2</sub> O	0.48	1.25
MnO <sub>2</sub>	-	0.14
TiO <sub>2</sub>	-	0.08
SO <sub>3</sub>	2.55	0.08
ZnO	-	-
PbO	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	0.01
SrO	-	-
Na <sub>2</sub> O	0.25	0.20
CuO	-	-

เปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีเมนต์แกลบพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแคลเซียม ( CaO ) เป็นส่วนใหญ่ คือมีแคลเซียมถึง 63.82 % มากกว่าในซีเมนต์แกลบ แต่มีส่วนรวมของซิลิกา , อลูมินา , และเหล็ก ( SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ) เท่ากับ 28.54 % เท่านั้น ซึ่งสารประกอบส่วนนี้จะทำปฏิกิริยาเคมีโดยรวมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( Ca(OH)<sub>2</sub> ) เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน ส่วนซีเมนต์แกลบกลับมีซิลิกา ( SiO<sub>2</sub> ) เป็นส่วนใหญ่คือมี 94.80% และมีผลรวมของซิลิกา , อลูมินาและเหล็ก ( SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ) เท่ากับ 96.27 % ซึ่งเป็นส่วนที่จะไปทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( Ca(OH)<sub>2</sub> ) หรือคือสารที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

## 2.3 ปฏิกริยาไฮเดรชัน ( Hydration ) และปฏิกริยาปอซโซลาน ( Pozzolan )

2.3.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน ( Hydration ) เป็นปฏิกริยาหลักของการเปลี่ยนสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้เป็นสารเชื่อมประสานเพื่อพัฒนากำลังรับแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารประกอบที่สำคัญต่อการพัฒนากำลังซึ่งเราสนใจศึกษา คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) เมื่อทำปฏิกริยาไฮเดรชันกับน้ำแล้วจะเกิดสารประกอบแคลเซียมไฮเดรท [Calcium Silicate Hydrate, (CSH)] และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Calcium Hydroxide,  $Ca(OH)_2$ ] อีกประมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนของปฏิกริยาไฮเดรชันคือ เมื่อผงซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำแล้ว จะเกิดเป็นไฮเดรทคอมพาวด์ (Hydrate Compound) โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



ปฏิกริยานี้จะดำเนินเรื่อยไป โดยแคลเซียม ( $CaO$ ) จะแยกตัวออกมาจาก แคลเซียมซิลิเกต ( $CaO \cdot SiO_2$ ) ไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [ $Ca(OH)_2$ ] จนสารละลายนั้นอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [ $Ca(OH)_2$ ] หรือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต ( $CaO \cdot SiO_2$ ) ทำปฏิกริยาไปจนหมดจากสารละลาย

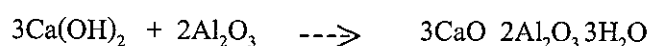
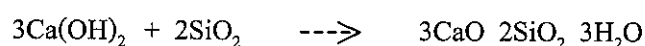
สารประกอบที่เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชัน ทั้ง 2 ส่วน คือ

1. แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (Calcium Silicate Hydrate, CSH) มีสูตรเคมีเป็น  $3CaO \cdot SiO_2 \cdot 3H_2O$  ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน
2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) มีสูตรเคมีเป็น  $Ca(OH)_2$  แคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระนี้สามารถทำปฏิกริยาต่อไปได้อีกถ้ามีธาตุที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกริยา

2.3.2 ปฏิกริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบเป็นสารปอซโซลานซึ่งความหมายของปอซโซลานนั้นหมายถึงวัสดุซึ่งตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่สามารถทำปฏิกริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระ แล้วก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสาน ดังนั้นเมื่อใส่วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมซีเมนต์ ( $SiO_2$ ) และอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) จากวัสดุปอซโซ



ลานจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระ  $[Ca(OH)_2]$  ซึ่งเป็นสารประกอบที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรก โดยอาจเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  และสารประกอบแคลเซียมอลูมินไฮเดรต  $3CaO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  เป็นสารประกอบที่ให้กำลังเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และการผสมซีเมนต์กับแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน เมื่อปฏิกิริยาเกิดช้าจะเป็นการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลงด้วย

### ข้อสรุปงานวิจัยที่ผ่านมา

**ประจิต จิรปภา (พ.ศ. 2525)** พบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์คงที่ การเติมซีเมนต์เข้าไปจะทำให้กำลังให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เติมเข้าไป และซีเมนต์ที่เติมเข้าไปในคอนกรีต สามารถใช้แทนซีเมนต์ได้ 25 และ 29% ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 2 1/2 เดือน ตามลำดับ โดยที่ยังได้กำลังคอนกรีตเท่าเดิม

**ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร (พ.ศ. 2528)** พบว่า กำลังรับแรงอัดระยะเริ่มแรกของปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์มีค่าลดลงตามปริมาณซีเมนต์ที่เติม เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น เมื่อเวลานานขึ้นกำลังรับแรงอัดจะดีขึ้นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานโดยที่ซีเมนต์บอยที่ใช้แทนซีเมนต์สามารถแทนได้ถึง 40 % โดยที่กำลังการรับแรงอัดยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์ยังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดาอีกด้วย

**กรกฎ วิจิตรพงศ์ (พ.ศ. 2531)** พบว่า การเติมซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตจะสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด ในรูปของการยุบตัว การไหล และการทำให้แน่น โดยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์ที่เติมลงในส่วนผสม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมซีเมนต์จะลดลงตามปริมาณซีเมนต์ที่เติมในส่วนผสม โดยจะมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง กล่าวคือ จะลดค่าประมาณ 10% ทุก ๆ 10% ของปริมาณซีเมนต์

**อุดม หงษ์ประธานพร (พ.ศ. 2533)** พบว่า การพัฒนากำลังรับแรงและการพัฒนาสารเชื่อมประสานของส่วนผสมที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ที่เหมาะสม จะให้ลักษณะการพัฒนากำลังรับแรงและสารเชื่อมประสานที่อายุช่วงแรกน้อยกว่าปูนซีเมนต์ด้วย แต่ในช่วงอายุหลัง กำลังรับแรงและสารเชื่อมประสานจะมากกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา โดยที่ปริมาณซีเมนต์เคลือบและซีเมนต์ลอยที่เหมาะสมในส่วนผสมคือ ประมาณ 20% โดยน้ำหนักซีเมนต์ (ส่วนผสมที่มีซีเมนต์ลอยให้ผลดีกว่าซีเมนต์เคลือบเล็กน้อยคือที่อายุ 90 วันกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์ลอยเท่ากับ 453 KSC. กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์เคลือบเท่ากับ 415 KSC.)

**ธนิต วิชาศิริวัฒน์ และ พิเชษฐ์ เลหาพจนาน (พ.ศ. 2533)** พบว่า ส่วนผสมคอนกรีตที่มีซีเมนต์ลอยจะมีค่าการยุบตัวสูง คือ ยังมีซีเมนต์ลอยมากค่าการยุบตัวยังสูง ซึ่งสามารถทำให้การทำงานคอนกรีตง่ายขึ้น ส่วนกำลังการรับแรงอัด, แรงดึง, และแรงยึดเหนี่ยวนั้น พบว่าในช่วงแรกของคอนกรีตที่ผสมซีเมนต์ลอยจะมีกำลังน้อยกว่าคอนกรีตล้วน แต่หลังจาก 14 วันไปแล้วคอนกรีตผสมซีเมนต์ลอยมีแนวโน้มการเพิ่มของกำลังรับแรงสูงมาก (กราฟการรับกำลังชันมาก) และซีเมนต์ลอยที่ผสมในคอนกรีตปริมาณที่เหมาะสมคือ 10-30 %

**ธงชัย ดลศรีชัย และ ชรินทร์ รุ่งเรืองพัฒนา (พ.ศ. 2533)** พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมซีเมนต์เคลือบจะมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความสามารถในการต้านทานซัลเฟตได้สูงมาก (ยิ่งผสมซีเมนต์เคลือบมากความต้านทานซัลเฟตยิ่งมากตาม) อีกทั้งซีเมนต์เคลือบมีความพรุนในตัวเองสูงเหมาะกับการทำเป็นวัสดุที่ประกอบการก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบา และมีแนวโน้มที่จะมีความสามารถในการเก็บเสียงได้ดี ปริมาณซีเมนต์เคลือบที่เหมาะสมสามารถผสมได้ในอัตราส่วนซีเมนต์ 70% ต่อซีเมนต์เคลือบ 30% โดยที่กำลังการรับแรงอัดลดลงประมาณ 20-40% นอกจากนี้กำลังการรับแรงอัดยังสามารถพัฒนาให้สูงขึ้นได้อีกถ้าสามารถบดซีเมนต์เคลือบมีความละเอียดมากขึ้นและซีเมนต์เคลือบถูกเผาในอุณหภูมิที่เหมาะสม

**พลสันธิ์ พุคะทรัพย์ และ ธนัญฐ วานิชชินนัย (พ.ศ.2536)** พบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ซีเมนต์เคลือบซีเมนต์ลอยเท่ากับ 90:5:5, 80:10:10 และ 70:5:25 จะเป็นคอนกรีตที่ให้กำลังอัดสูงที่สุดในระยะเวลาการบ่ม 60 วัน และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 90% และ 80% ให้กำลังการรับแรงดึงและกำลังแรงยึดเหนี่ยวที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตผสม 100:0:0

**บุรณัตถ์ ฉัตรวีระ และ พิชัย นิमितยงสกุล (พ.ศ. 2539)** พบว่า การแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีเมนต์เคลือบละเอียดนาน 75 นาทีในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผง และใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละ 1.43 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ดี