บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

ในทางวิศวกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอุปกรณ์ก่อสร้างที่สำคัญซึ่งมีราคาแพง ถ้าเราสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงโดยให้คุณสมบัติทางด้านกำลังคงเดิมก็จะการประหยัดที่ดีดังนั้นในอดีตจึงมีผู้สนใจในวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ (Pozzolan) เช่น ขี้เถ้าลอยจากถ่านหิน, ขี้เถ้าแกลบจากการเผาแกลบ และฝุ่นหิน ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่เหลือใช้จากธรรมชาติและหาได้ไม่ยากนัก ดังนั้นคณะผู้จัดทำโครงงานจึงได้ทำการศึกษาว่าจะสามารถจะนำวัสดุ Pozzolan เหล่านี้มาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตร่วมกับปูนซีเมนต์ได้หรือไม่และคุณสมบัติที่ได้เป็นอย่างไร ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับโครงงาน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ใช้ทดลอง
2. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.1 ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ใช้ทดลอง

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในทางวิศวกรรมโดยเมื่อผสม หิน ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้คอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งแรงทนทานคล้ายหินปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลิตผลที่ได้จากการเผาส่วนผสมต่างๆที่อุณหภูมิประมาณ 1400 ถึง 1500 องศาเซลเซียส

2.1.1.1 วัตถุดิบ วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแบ่งได้ 2 ประเภทคือ ประเภทที่ 1 ให้ธาตุแคลเซียม ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ปูนขาว ประเภทที่ 2 ให้ธาตุซิลิก้า และอลูมิน่า ได้แก่ หินเชล ดินเหนียวและหินชนวน

2.1.1.2 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อเผาส่วนผสมของปูนซีเมนต์แล้วสารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิก้า อลูมิน่า และเหล็ก จะทำปฏิกิริยาเคมีรวมตัวกันได้สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่างดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3CaO.SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2CaO.SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

2.1.1.3 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากจำนวนของสารประกอบจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์แล้ว ชนิดของสารประกอบก็เป็นสิ่งสำคัญที่เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะต่างๆของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังนี้

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate ,C_3S) จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังอัดได้เร็วให้กำลังสูงและเกิดความร้อนมาก การเพิ่มยิปซัม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสภาพพลาสติกมากขึ้นและช่วยหน่วงเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ช้าลง

ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate ,C_2S) จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้า ให้กำลังสูงและเกิดความน้อย การเพิ่มยิปซัมจะได้ผลหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บ้างเล็กน้อย

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate ,C_3A) จะก่อตัวทันทีเมื่อผสมกับน้ำให้ความร้อนสูง จะทำให้กำลังรับแรงมีน้อยในวันแรกๆและจะไม่ทำให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่จะมีประโยชน์คือช่วยเร่งปฏิกิริยาของไดแคลเซียมซิลิเกต

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเปอร์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกตรวมทั้งสิ้นประมาณ 70% - 80% เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1.1.4 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีส่วนประกอบที่สำคัญคือแคลเซียมประมาณ 60% และซิลิก้าประมาณ 20% ซึ่งทั้งสองธาตุนี้เป็นองค์ประกอบสำคัญของไดแคลเซียมซิลิเกตและไตรแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งจะทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รับกำลังได้สูง

2.1.2 ฝุ่นหิน

ฝุ่นหินเป็นผลพลอยได้จากการโม่ บด ย่อย สกัดหรือระเบิดหินตามโรงโม่หินที่นำไปใช้ในการก่อสร้าง โดยในประเทศไทยนิยมใช้หินปูนเป็นส่วนใหญ่

หินปูน(Limestone) หรือแร่แคลไซด์(Calcite)มีองค์ประกอบทางเคมีคือแคลเซียมคาร์บอเนต(Calcium Carbonate: $CaCO_3$)นอกจากหินปูนแล้วยังมีหินและแร่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ได้แก่ หินอ่อน (Marble) ดินมาร์ล (Male) ชอล์ค(Chalk) ซึ่งในประเทศอังกฤษและในประเทศสหรัฐอเมริกาจะรู้จักชอล์คในชื่อไวติง(Whiting)

ส่วนประกอบของหินปูน โดยทั่วไปประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 56.03 คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 43.97 และเฟอร์ริกออกไซด์ น้อยกว่าร้อยละ 3 ส่วนสมบัติอื่นๆ ได้แก่ ความแข็ง เท่ากับ 3 ความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.7 จุดหลอมเหลว เท่ากับ 2850 องศาเซลเซียส แต่จะสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 900 องศาเซลเซียส

แหล่งที่พบในประเทศไทย คือ จังหวัดราชบุรี สระบุรี และกาญจนบุรี เป็นต้น

2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan)

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) เป็นปฏิกิริยาหลักของการเปลี่ยนสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้เป็นสานเพื่อพัฒนากำลังรับแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สารประกอบที่สำคัญต่อการพัฒนากำลังซึ่งเราสนใจศึกษา คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับน้ำแล้ว จะเกิดสารประกอบแคลเซียมไฮเดรต (Calcium Slicate Hydrate , CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydrate , $Ca(OH_2)$) อีกประมาณ 20% ถึง 50%

ขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คือ เมื่อผงซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำแล้ว จะเกิดเป็นไฮเดรตคอมปาวด์ (Hydrate Compound) โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งเป็นสมการเคมี ดังนี้

$$2(3CaO\ SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO\ SiO_2\ 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO\ SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO\ SiO_2\ 3H_2O + Ca(OH)_2$$

ปฏิกิริยานี้จะดำเนินเรื่อยไป โดยแคลเซียม (CaO) จะแยกตัวออกมาจาก แคลเซียมซิลิเกต ($CaO\ SiO_2$) ไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จนสารละลายอิ่มตัวด้วยแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต($CaO\ SiO_2$) ทำปฏิกิริยาไปจนหมดจากสารละลาย

สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น มี 2 ส่วน คือ

1. แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) มีสูตรเคมีเป็น $3CaO\ SiO_2\ 3H_2O$ ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน

2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) มีสูตรเคมีเป็น $Ca(OH)_2$ แคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระนี้สามารถทำปฏิกิริยานี้ต่อไปได้อีกถ้ามีธาตุที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

2.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ขี้เถ้าเถ้า ขี้แกลบ รวมไปถึงหินฝุ่นเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งความหมายของปอซโซลานนั้นหมายถึงวัสดุซึ่งตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระ แล้วก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสาน ดังนั้นเมื่อใส่วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมซิลิก้า (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2O_3) จากวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นสารประกอบที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงแรก โดยอาจเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO\ 2SiO_2\ 3H_2O$$

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO\ 2SiO_2\ 3H_2O$$

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO\ 2SiO_2\ 3H_2O$) และสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($CaO\ 2Al_2O_3\ 3H_2O$) เป็นสารประกอบที่ให้กำลังเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ และการผสมฝุ่นหินแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าขึ้นซึ่งจะเป็นการช่วยลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลงด้วย

<u>ข้อสรุปงานวิจัยที่ผ่านมา</u>

ข้อสรุปงานวิจัยที่ผ่านมา

ประจิต จิรัปปภา (พ.ศ.2525) พบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์คงที่การเติมขี้เถ้าลอยเข้าไปจะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นตามปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมเข้าไป และขี้เถ้าลอยที่เติมเข้าไปในคอนกรีตสามารถใช้แทนซีเมนต์ได้ 25 และ 29% ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 2½ เดือน ตามลำดับ โดยที่ยังได้กำลังคอนกรีตเท่าเดิม

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ **อินทรชัย หอวิจิตร** (พ.ศ.2528) พบว่า กำลังรับแรงอัดที่ระยะเริ่มแรกของซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยมีค่าลดลงตามปริมาณขี้เถ้าลอย เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น เมื่อเวลานานขึ้นกำลังรับแรงอัดจะดีขึ้นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยที่ขี้เถ้าลอยที่ใช้แทนซีเมนต์สามารถแทนได้ถึง 40%โดยที่กำลังรับแรงอัดยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยยังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดาอีกด้วย

กรกฎ วิจิตรพงศ์ (พ.ศ.2531) พบว่าการเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตจะสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด ในรูปของการยุบตัว การไหล และการทำให้แน่น โดยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขี้ถ้าลอยที่เติมลงในส่วนผสม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่เติมในส่วนผสม โดยจะมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง กล่าวคือ จะลดค่าประมาณ 10% ในทกๆ 10% ของปริมาณขี้เถ้าลอย

อุดม หงษ์ประธานพร (พ.ศ.2533) พบว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดและการพัฒนาสารเชื่อมประสานของส่วนผสมที่มีอัตราส่วนขี้เถ้าที่เหมาะสม จะให้ลักษณะการพัฒนากำลังรับแรงอัดและสารเชื่อมประสานที่อายุช่วงแรกน้อยกว่าปูนซีเมนต์ด้วย แต่ในช่วงอายุหลังกำลังรับแรงอัด และสารเชื่อมประสานจะมากกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา โดยที่ปริมาณขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอยที่เหมาะสมในส่วนผสม คือ ประมาณ 20 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (ส่วนผสมที่มีขี้เถ้าลอยให้ผลดีกว่าขี้เถ้าแกลบเล็กน้อยคือที่ อายุ 90 วัน กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับ 453 ksc. กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบเท่ากับ 415 ksc.)

ธนิต วิธานติรวัฒน์ และ **พิเชษฐ์ เลาหจนาถ** (พ.ศ.2533) พบว่า ส่วนผสมคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีค่าการยุบตัวสูง คือ ยิ่งมีเถ้าลอยมากค่าการยุบตัวยิ่งสูง ซึ่งสามารถทำให้การทำงานง่านขึ้น ส่วนกำลังรับแรงอัด , แรงดึง และแรงยึดเหนี่ยวนั้น พบว่าในช่วงแรกของคอนกรีตที่ผสมขี้เถ้าลอยจะมีกำลังน้อยกว่าคอนกรีตล้วน แต่หลังจาก 14 วันไปแล้วคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีแนวโน้มการเพิ่มของกำลังรับแรงสูงขึ้นมาก (กราฟรับกำลังชันมาก) และปริมาณขี้เถ้าลอยที่เหมาะสม คือ 10 – 30%

ธงชัย คลศรีชัย และ **ชนินทร์ รุ่งเรืองพัฒนา** (พ.ศ.2533) พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของขี้เถ้าแกลบจะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้สูงมาก (ยิ่งผสมขี้เถ้าแกลบมากความต้านทานซัลเฟตยิ่งสูงตาม) อีกทั้งขี้เถ้าแกลบมีความพรุนในตัวเองสูงเหมาะกับการทำเป็นวัสดุประกอบการก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบา และมีแนวโน้มที่จะมีความสามารถในการเก็บเสียงได้ดี ปริมาณขี้เถ้าแกลบที่เหมาะสมสามารถผสมได้ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ 70% ต่อขี้เถ้าแกลบ 30% โดยที่กำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 20 -40%นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดยังสามารถพัฒนาให้สูงขึ้นได้อีกถ้าสามารถบดขี้เถ้าแกลบให้มีความละเอียดมากขึ้น และขี้เถ้าแกลบถูกเผาในอุณหภูมิที่เหมาะสม

พลสันต์ พุกทรัพย์ และ **ธนณัฐ วานิชชินนัย** (พ.ศ.2536) พบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์ :ขี้เถ้าแกลบ : ขี้เถ้าลอย เท่ากับ 90:5:5 , 80:10:10 , และ 70:5:25 จะเป็นคอนกรีตที่ให้กำลังอัดสูงที่สุดที่ระยะเวลาการบ่ม 60 วัน และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 90% และ 80% ให้กำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวที่ใกล้เคียงกับกับคอนกรีตธรรมดา

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ **พิชัย นิมิตยงสกุล** (พ.ศ.2539) พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าแกลบบดละเอียดนาน 75 นาที ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผง และใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละ 1.43 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ดี