หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในงานด้านวิศวกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญ ซึ่งมีราคาแพง ถ้าเราสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง โดยให้คุณสมบัติทางด้านกำลังคงเดิมก็จะเป็นการประหยัดที่ดี ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาจึงมีผู้สนใจในวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ (Pozzolan) เช่น ขี้เถ้าลอย จากถ่านหิน นักวิจัยได้ทำการศึกษาว่าสามารถนำขี้เถ้าลอยมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์หรือไม่ และคุณสมบัติที่ได้เป็นอย่างไร หัวข้อการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศและต่างประเทศ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีตที่เกี่ยวกับงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ทำการวิจัย
- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปัซโซลาน (Hydration and Pozzolanic Reaction)
- ทบทวนผลงานในอดีต

2.1 ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ทำการวิจัย

2.1.1 <u>ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u> ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในทางวิศวกรรม โดยที่เมื่อผสมกับ หิน ทราย และน้ำ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม จะได้คอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งแรงทนทานคล้ายหินปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ ที่อุณหภูมิประมาณ 1400 ถึง 1500 องศาเซลเซียส

2.1.1.1 วัตถุดิบ วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ประเภทที่หนึ่ง ให้ธาตุคัลเซี่ยม ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว ประเภทที่สอง ให้ธาตุซิลิก้าและอลูมิน่า ได้แก่ หินเชล ดินเหนียว หินชนวน

2.1.1.2 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อเผาส่วนผสมของปูนซีเมนต์แล้ว สารออกไซด์ของธาตุคัลเซี่ยม ซิลิก้า อลูมิน่าและเหล็ก จะทำปฏิกริยาเคมีรวมตัวกันได้สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต	$3CaO.SiO_2$	C_3S
ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต	$2CaO.SiO_2$	C_2S
ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
เทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

2.1.1.3 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากจำนวนของสารประกอบจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์แล้ว ชนิดของสารประกอบก็เป็นตัวสำคัญที่กำหนดคุณลักษณะต่างๆ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนี้

ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต [Tricalcium Silicate,(C_3S)] จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้เร็ว ให้กำลังสูง และเกิดความร้อนมาก การเพิ่มยิปซั่มจะทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสภาพพลาสติกมากขึ้น และช่วยหน่วงเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ช้าลง

ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต [Dicalcium, Silicate , (C_2S)] จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้าให้กำลังสูง และเกิดความร้อนน้อย การเพิ่มยิปซั่มจะให้ผลหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บ้างเล็กน้อย

ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต [Trialcium aluminate, (C_3A)] จะก่อตัวทันทีที่ผสมกับน้ำให้ความร้อนสูง จะให้กำลังรับแรงเล็กน้อยในวันแรก และจะไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่จะมีประโยชน์ คือ ช่วยเร่งปฏิกิริยาของไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต

เทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ [Tetracalcium aluminoferrite, (C_4AF)] จะก่อตัวอย่างรวดเร็วแต่ช้ากว่า และให้ความร้อนน้อยกว่า ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนตเล็กน้อย ส่วนการให้กำลังรับแรง ยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบของไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต (C_3S) และไดคัลเซี่ยมซิลิเกต (C_2S) รวมประมาณ 70 ถึง 80 เปอร์เซนต์ และเป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะฉะนั้นในการศึกษาโดย X - Ray Diffraction จะสนใจที่จะศึกษาสารประกอบไทรคัลเซียมซิลเกต (C_3S,) สารประกอบไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) และสารเชื่อมประสานคัลเซี่ยม ซิลิเกตไฮเดรต [Calcium Silicate Hydrate (C-S-H)] ซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดการเชื่อมประสาน และรับกำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชั่นแล้ว

2.1.1.4 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คัลเซี่ยม (CaO) ประมาณ 60 เปอร์เซนต์ และ ซิลิก้า (SiO_2) ประมาณ 20 เปอร์เซนต์ ซึ่งทั้ง 2 ธาตุนี้เป็นสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต และไดคัลเซี่ยมซิลิเกตซึ่งจะให้กำลังรับแรงได้สูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1.2 <u>ขี้เถ้าลอย</u> ขี้เถ้าลอยคือ ขี้เถ้าส่วนละเอียดที่สุดจากการเผาไหม้ถ่านหิน มีขนาดเล็กมาก อาจจะละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วๆ ไป รูปร่างมักมีลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลม เนื่องจากส่วนประกอบและวิธีการเกิดคล้ายคลึงกับการเกิดของขี้เถ้าภูเขาไฟ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปัซโซลาน (Pozzolan) ขี้เถ้าลอยจึงมีคุณลักษณะในทำนองเดียวกัน หน่วยงานหลายแห่งได้ค้นคว้าและกำหนดกฎเกณฑ์ของขี้เถ้า เพื่อใช้ในงานคอนกรีต เช่น American Society for Testing Materials (ASTM) เป็นต้น

2.1.2.1 วัตถุดิบ วัตถุดิบที่ทำให้เกิดขี้เถ้าลอยคือ ถ่านหิน เมื่อถ่านหินถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้แล้วจะได้ขี้เถ้า ถ่านหินที่ใช้นี้มีอยู่ 4 ประเภท คือ

1. แอนทราไซด์ (Antracite)
2. บิทูมินัส (Bituminous)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ซับบิทูมินัส (Sub - Bituminous)

4. ลิกไนต์ (Lignite)

ถ่านหินถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงมาช้านาน ถ่านหินในประเทศแถบยุโรป ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา ส่วนมากเป็นถ่านหินคุณภาพสูง คือ ให้พลังงานความร้อนมาก มีอายุการเกิดยาวนาน ได้แก่พวก แอนทราไซด์ บิทูมินัส ซับมิทูมินัส แต่ในประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำเป็นเชื้อเพลิง อาจทำให้คุณสมบัติของขี้เถ้าลอยในประเทศไทย แตกต่างกับขี้เถ้าลอยจากถ่านหินคุณภาพสูงในต่างประเทศ จึงเป็นจุดที่น่าทำการศึกษา

2.1.2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอย ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทย จะมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เป็นส่วนใหญ่ เป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนดของ ASTM C 618 ในตารางที่ 2.2 และนอกจากนั้นขี้เถ้าลอยมีค่าจำนวนของ CaO มากพอควร ส่วนที่สำคัญที่สุดคือ มีค่าจำนวน อนุมูลซัลเฟตSO_3 ต่ำ เหมาะแก่การนำไปใช้งาน

ตารางที่ 2.2 มาตรฐาน ASTM C 618-85 สารวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ

		ชั้นของวัสดุผสม		
		N	F	C
$SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3$	% น้อยที่สุด	70.0	70.0	50.0
SO_3	% มากที่สุด	4.0	5.0	5.0
Pozzolanic Index	% น้อยที่สุด	75	75	75
ปริมาณน้ำที่ต้องการ	% มากที่สุด	115	105	105

2.1.2.3 อิทธิพลของขี้เถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าลอยเป็นสารปัซโซลาน (Pozzolan) อย่างหนึ่งส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญในขี้เถ้าลอย คือ

ซิลิก้า (SiO_2) อลูมิน่า (Al_2O_3) เหล็ก (Fe_2O_3) จะสามารถทำปฏิกริยาทางเคมีกันกับ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) ในน้ำปูน เกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ คัลเซียม ซิลิเกตไฮเดรท [Calcium Silicate Hydrate , (C-S-H)] ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานให้ กำลังรับแรงของคอนกรีต เป็นส่วนที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกริยาไฮเดรชั่น ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1.3 ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้าแกลบคือขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ของแกลบ ขี้เถ้าแกลบที่ได้จาก การเผาไหม้ในลักษณะต่างกัน จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปบ้าง เช่น ถ้าเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี ข้าวเป็นการเผาที่ใช้เวลาน้อยอุณหภูมิไม่สูงมากจะได้ขี้เถ้าที่มีสีดำเป็นส่วนใหญ่ เพราะมีส่วนประกอบ ของคาร์บอนสูง มีขนาดใหญ่ มีคุณสมบัติในการพัฒนากำลังเมื่อผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่ำ แต่ถ้า การเผาไหม้อยู่ในการควบคุม หรือใช้อุณหภูมิสูงและเวลาในการเผาไหม้นานพอ เราจะได้ขี้เถ้า แกลบที่มีลักษณะดี มีสีขาว ปริมาณคาร์บอนต่ำ และคุณสมบัติในการพัฒนากำลังเมื่อผสมในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ดีขึ้น

2.1.3.1 วัตถุดิบ วัตถุดิบคือแกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกตามปกติ

2.1.3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบ มีซิลิก้า (SiO_2) สูงมาก คือ ประมาณ 90 เปอร์เซนต์ เป็นไปตามมาตรฐานข้อ กำหนดของ ASTM C 618 ในตารางที่ 2.2 คัลเซี่ยม (CaO) ต่ำมาก ไม่ถึง 1 เปอร์เซนต์ และที่สำคัญมากคือ เกือบจะไม่มีอนุมูลซัลเฟต (SO_3) เลย

2.1.3.3 อิทธิพลของขี้เถ้าแกลบต่อการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้า แกลบมีลักษณะการเกิด และส่วนประกอบทางเคมีคล้ายขี้เถ้าลอย และเป็นสารปัซโซลาน (Pozzolanas) อย่างหนึ่ง โดยซิลิก้า (SiO_2) ในขี้เถ้าแกลบ สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] ในน้ำปูน

2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปัซโซลาน (Hydration and Pozzolanic Reaction)

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเป็นปฏิกิริยาหลัก ของ การเปลี่ยนสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้เป็นสารเชื่อมประสาน เพื่อพัฒนากำลังรับแรง

ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารประกอบที่สำคัญต่อการพัฒนากำลังซึ่งเราสนใจศึกษา คือ ไทรคัลเซียม ซิลิเกต (C_3S) และไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับน้ำแล้ว จะเกิดสาร ประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท [Calcium Silicate Hydrate , (CSH)] และ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ [Calcium Hydroxide, $Ca(OH)_2$] อีกประมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซนต์

ขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คือ เมื่อผงซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำแล้ว จะเกิดเป็น ไฮเดรทคอมปาว (hydrate compound) โดย ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) และ ไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

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

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

ปฏิกิริยานี้จะดำเนินเรื่อยไป โดย คัลเซียม (CaO) จะแยกตัวออกมาจาก คัลเซียมซิลิเกต ($CaO\ Sio_2$) ไปเป็น คัลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] จนสารละลายนั้นอิ่มตัวด้วย คัลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] หรือสารประกอบ คัลเซียมซิลิเกต ($CaO\ SiO_2$) ทำปฏิกิริยาไปจนหมดจากสารละลาย

สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทั้ง 2 ส่วน คือ

1. คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (Calcium Silicate Hydrate , CSH) มีสูตรเคมีเป็น $3CaO\ Sio_2\ 3H_2O$ ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน
2. คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) มีสูตรเคมีเป็น [$Ca(OH)_2$] คัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระนี้สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้ามีธาตุที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

2.2.2 ปฏิกิริยาปัซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบเป็นสารปัซโซลาน ซึ่งความหมายของสารปัซโซลานนั้นหมายถึงวัสดุซึ่งตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระแล้วก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสาน ดังนั้นเมื่อใส่วัสดุปัซโซลานในส่วนผสมซิลิก้า (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2O_3) จากวัสดุปัซโซลาน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะทำปฏิกิริยาปัชโซลานกับคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อิสระ $[Ca(OH)_2]$ ซึ่งเป็นสารประกอบที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงแรก โดยอาจเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \quad ----> \quad 3CaO\ 2SiO_2 3H_2O$$

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \quad ----> \quad 3CaO\ 2Al_2O_3 3H_2O$$

สารประกอบแคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท$3CaO\ 2SiO_2 3H_2O$ และสารประกอบคัลเซี่ยมอลูมิเนตไฮเดรท $3CaO\ 2Al_2O_3 3H_2O$ เป็นสารประกอบที่ให้กำลังเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปัชโซลาน ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปัชโซลานจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ และการผสมขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน เมื่อปฏิกิริยาเกิดช้าจะเป็นการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลงด้วย

2.3 ทบทวนผลงานในอดีต

ผลงานในอดีตบางส่วนรวบรวมจาก ประจิต (2525) และปริญญา (2528)

Davis และคณะ (1937) ได้ศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปัชโซลาน โดยการผสมขี้เถ้าลอยเข้ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา การผสมทำโดยการคลุกเข้ากันและการบดรวมกัน สรุปผลจากการศึกษาได้คือ

ขี้เถ้าลอยมีลักษณะเม็ดกลมและขนาดเล็กมาก บางส่วนเม็ดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การผสมขี้เถ้าลอยโดยการคลุกเข้ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มักได้ผลเท่ากับ หรือดีกว่าการบดรวมกัน

ระยะเวลาการก่อตัว (time setting) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยจะช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ล้วน

ขี้เถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ความละเอียดสูง จะมีคุณสมบัติปัชโซลานสูง ซึ่งอาจใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้สูงถึง 30 เปอร์เซนต์ และจากสภาพการบ่มมาตรฐานจะได้กำลังรับแรงที่อายุน้อยต่ำ แต่จะค่อนไปทางข้างมากกว่าเมื่ออายุมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย และของปูนซีเมนต์ล้วนๆ จะต้องการปริมาณน้ำใกล้เคียงกัน แต่คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน จะให้

ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยกว่า ต้านทานซัลเฟตได้ดีกว่า คอนกรีตที่ผสมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

A.G. Tinns และ W.E.Grieb (1956) ได้ศึกษาขี้เถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.2, 0.6 , 5.0 และ 11.2 พบว่า เมื่ออายุ 7 วัน คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีกำลังต่ำกว่า แต่เมื่ออายุ 28 วัน จะได้กำลังใกล้เคียงกัน และเมื่ออายุ 1 ปี จะมีกำลังมากกว่าคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และระหว่างชนิดของขี้เถ้าลอย ขี้เถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า จะได้กำลังสูงกว่า ขี้เถ้าที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ในอัตราส่วนผสมเดียวกัน

R.H. Brink และ W.J. Halstead (1956) พบว่าปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การพัฒนากำลังต่ำลง เพราะคาร์บอนไม่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และมีน้ำหนักมาก ความเป็นปัชโซลานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความละเอียด

G.W. Washa และ N.H. Withey (1958) ทำการศึกษาขี้เถ้าลอยชิคาโก มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 2 เปอร์เซนต์ และมีความละเอียดสูงระหว่าง 3200-4200 ตารางเซนติเมตรต่อหนึ่งกรัม พบว่า

ขี้เถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต้องมีปริมาณมากกว่าปริมาณปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ลดลง ถ้าต้องการให้กำลังรับแรงที่อายุ 28 วัน คงเดิม

เมื่ออายุ 1 ปี คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย 20 เปอร์เซนต์โดย น้ำหนักของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมีกำลังสูงกว่า คอนกรีตที่ไม่ผสมขี้เถ้าลอย

คอนกรีตที่ผสมขี้เถ้าลอย 70 ถึง 188 ปอนด์ต่อลูกบาศก์หลา จะลดปริมาณน้ำที่ต้องการได้ 1 ถึง 2.5 แกลลอน โดยที่ค่าความข้นเหลวยังคงที่

C.E. Lovewell และ G.W. Washa (1958) พบว่า ถ้าต้องการกำลังรับแรงเมื่ออายุ 3-28 วันใกล้เคียงกับเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ต้องผสมขี้เถ้าลอยแทนที่มากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ลดลง เช่น คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4 ถุง (376 ปอนด์) ต่อหนึ่งลูกบาศก์หลา ใช้ขี้เถ้าลอย 175 ปอนด์ แทนปูนซีเมนต์ 1 ถุง (94 ปอนด์) หรือ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 6 ถุง (564 ปอนด์) ต่อหนึ่งลูกบาศก์หลา ต้องใช้ขี้เถ้าลอย 100 ปอนด์ แทนที่ปูน

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3 ใน 4 ถุง (70.5 ปอนด์)

Cannon (1968) อธิบายว่า ขี้เถ้าลอยช่วยให้กำลังเพิ่มสูงขึ้นได้ 3 ลักษณะ คือ

1. ทำให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยลง
2. เพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสานในส่วนผสม
3. โดยปฏิกิริยาปัซโซลาน

สองลักษณะแรกเป็นผลต่อกำลังในอายุช่วงแรก ลักษณะที่สามช่วยให้กำลังเพิ่มสูงขึ้นในช่วงอายุมากขึ้น

Kawahara และ Denzai (อ้างถึงใน Kokubu 1968) พบว่าปริมาณน้ำที่ต้องการลดลงในการผสมขี้เถ้าลอยเข้าไปนั้น ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของคอนกรีต สัดส่วนคละของมวลละเอียด ความละเอียดและปริมาณของขี้เถ้าลอย จากการทดลองใช้ขี้เถ้าลอย 25 เปอร์เซนต์ พบว่าปริมาณน้ำที่ต้องการลดลง ประมาณ 7 เปอร์เซนต์

Ravina (1980) พบว่าค่าดัชนีความเป็นปัซโซลานเพิ่มขึ้นเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น

Watt และ Thorne (อ้างถึงใน Kokabu 1963) พบว่าค่าดัชนีความเป็นปัซโซลานเพิ่มขึ้นเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น

Sokurai (อ้างถึงใน Kokubu 1968) สารประกอบของขี้เถ้าลอยที่สำคัญมี ควอทซ์ (Quartz) มูลไลต์ (Mullite) และกล๊าส (glass) ซึ่งซิลิก้าจะอยู่ในรูปของ ควอทซ์และกล๊าส ส่วนอลูมิเนียมอยู่ในรูปของมูลไลต์ ออกไซด์และกล๊าส เขาพบว่าส่วนที่เป็นกล๊าส เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปัซโซลาน ส่วนสารประกอบอื่นๆ คือ ควอทซ์และมูลไลต์อยู่ในสภาพของผลึก (Crystal) ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาน้อยมาก

Kovas (1975) ได้ศึกษาพฤติกรรมและผลิตผล จากการไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยโดยวิธีเอ๊กซเรย์ (X-Ray Diffraction) และการวิเคราะห์โดยใช้ความร้อน (Thermal Analysis) พบว่ารูปแบบของการไฮเดรชั่นของปฏิกิริยาปัซโซลานคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าโดยทั่วไปปฏิกิริยาปัซโซลานของขี้เถ้า

ลอยจะสิ้นสุดเมื่อ อายุประมาณ 3 เดือน และอาจล่าช้าถึง 1 ปี ซึ่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และขี้เถ้าลอย

Kokubu (1968) ได้รวบรวมส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอย ที่พบในต่างประเทศ ดังตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบส่วนใหญ่คือ ซิลิก้า (SiO_2) และอลูมีน่า (Al_2O_3) ซึ่งเมื่อผสม กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แล้ว จะทำปฏิกิริยากับแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] ที่เกิดจากการ เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในช่วงแรก

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอยในต่างประเทศ KOKUBU (1968)

ส่วนประกอบ (%)	ขี้เถ้าลอย (%)	ปูนซีเมนต์ (%)
CaO	3 - 6	60 - 70
SiO_2	41 - 48	17 - 25
Al_2O_3	21 - 27	3 - 8
Fe_2O_3	4 - 17	0.5 - 0.6
MgO	1.6 - 2.5	0.1 - 4.0
SO_3	0.3 - 1.6	1 - 3
Na_2O	0.6 - 1.5	-
K_2O	1.9 - 2.9	0.2 - 1.3
การสูญเนื่องจากการเผา	0.7 - 9.7	0.5 - 3
ความละเอียด	3090-5180 cm2/gm	2800 cm2/gm
ความถ่วงจำเพาะ	2.1 - 2.4	3.15

หมายเหตุ ค่าต่างๆ ของขี้เถ้าลอยเป็นค่าเฉลี่ยของขี้เถ้าลอย จากประเทศญี่ปุ่น รัสเซีย อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส และเยอรมัน

ผดุง จุลทะเกาศลย์ (พ.ศ.2528) ชี้เถ้าจากถ่านหินลิกไนต์โรงไฟฟ้าแม่เมาะ มี 3 ลักษณะ

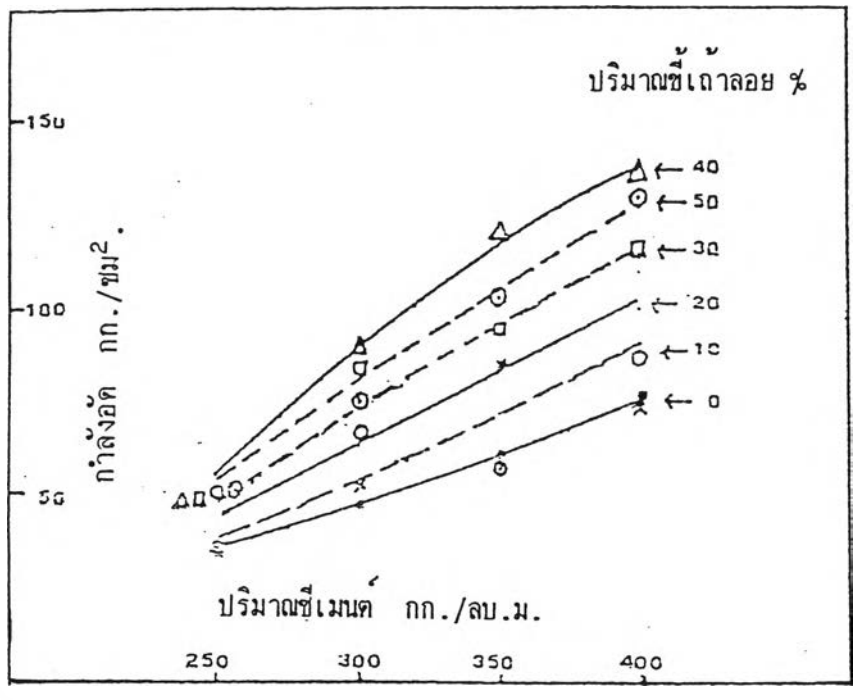
1. ชี้เถ้าตะกรันจำนวนเล็กน้อย
2. ชี้เถ้าก้นเตา 18 เปอร์เซนต์
3. ชี้เถ้าลอย 82 เปอร์เซนต์

ประจิต จิรัปปภา (พ.ศ.2523) ได้สรุปว่าชี้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะมีคุณสมบัติปัซโซลานสูง เมื่อใช้กำลังรับแรงอัดเป็นดัชนี แต่การผสมปูนขาวเข้าไปในชี้เถ้าจะทำให้คุณสมบัติปัซโซลานลดลง และซีเมนต์ผสมชี้เถ้าลอยตั้งแต่ 0 ถึง 25 เปอร์เซนต์ มีคุณภาพดีกว่าปูนซีเมนต์ตราเสือ เมื่อพิจารณากำลังอัดของก้อนมอร์ต้าทดสอบเป็นหลักการนำชี้เถ้าลอยมาผสมทำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปัซโซลาน เพื่อใช้ในงานคอนกรีต จึงเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ และการผสมชี้เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้ความข้นเหลวปกติสูงขึ้นเล็กน้อย

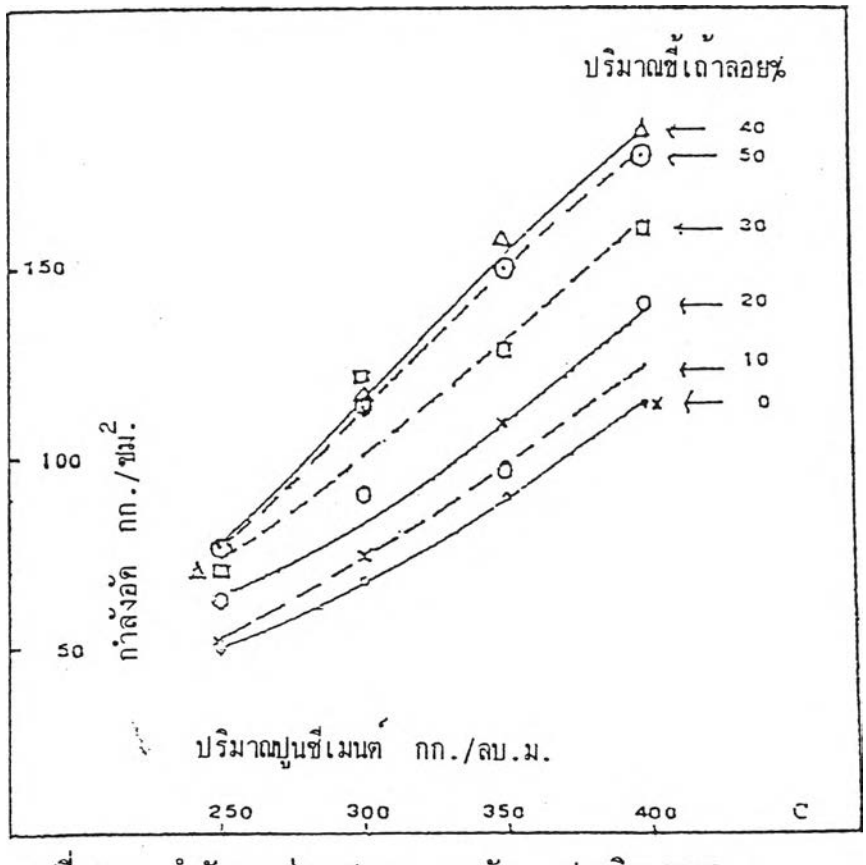
ประจิต จิรัปปภา (กันยายน 2525) ทำการผสมชี้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เข้าไปในคอนกรีต โดยมีอัตราส่วนระหว่างชี้เถ้าลอยต่อซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็น 0 , 0.1 , 0.2 ,0.3 . 0.4 และ 0.5 ปริมาณซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 250 , 300 , 350 และ 400 กิโลกรัมต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.5 , 0.75 , 1.00 และ 1.25 เป็นคอนกรีต 96 ส่วนผสมหล่อก้อนทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้วสูง 6 นิ้ว ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดเมื่ออายุ 3 , 7 , 28 วัน 2 , 4 , 6 และ 8 เดือน พบว่าสามารถเติมชี้เถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้สูงถึง 25 และ 29 เปอร์เซนต์ ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 2 1/2 เดือน ตามลำดับโดยยังให้กำลังคอนกรีตเท่าเดิม ได้สร้างกราฟเพื่อใช้เป็น ข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ชี้เถ้าลอย ดังรูปที่ 2.1, 2.2, 2.3

016299

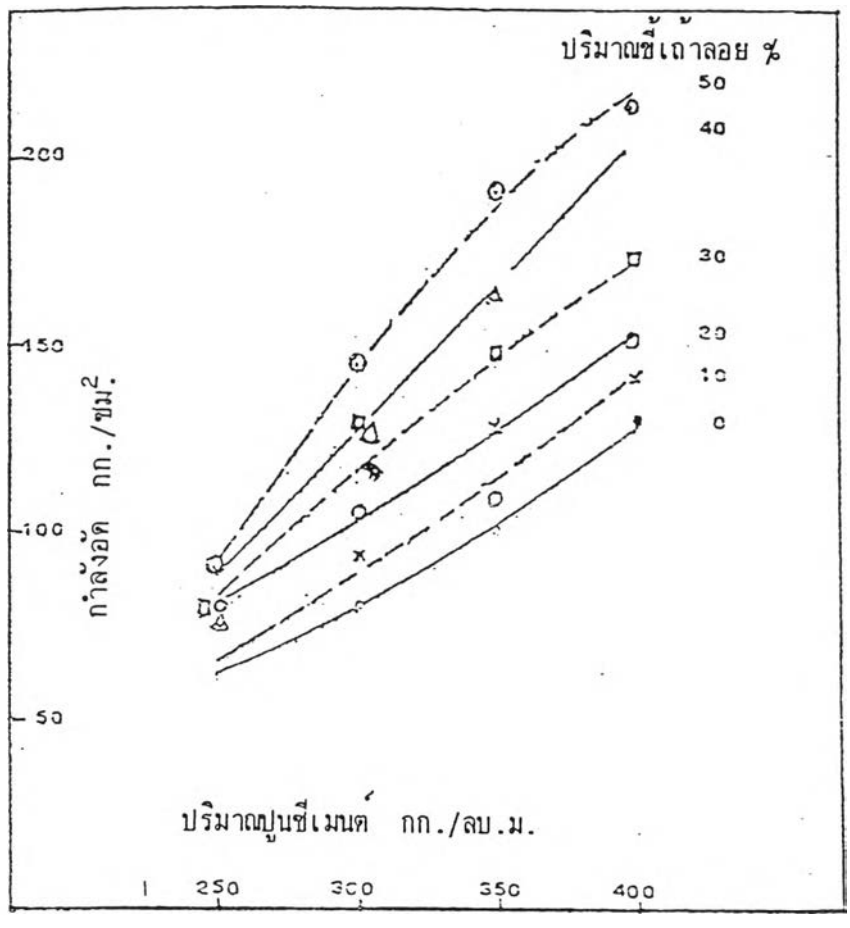
1030734



รูปที่ 2.1 กำลังและส่วนผสมอายุ 7 วัน (ประจิต 2525)



รูปที่ 2.2 กำลังและส่วนผสมอายุ 28 วัน (ประจิต 2525)



รูปที่ 2.3 กำลังและส่วนผสมอายุ $2\frac{1}{2}$ เดือน (ประจิต 2525)

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร (มกราคม 2528) พบว่า กำลังรับแรงอัดระยะเริ่มแรกของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย มีค่าลดลงตามปริมาณขี้เถ้า เพราะปฏิกิริยาปัซโซลานยังไม่เกิดขึ้น เมื่อเวลานานขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยจะดีขึ้น เพราะปฏิกิริยาปัซโซลาน การผสมขี้เถ้าลอยพอเหมาะในช่วง 0 - 40 เปอร์เซนต์ ทำให้ปฏิกิริยาปัซโซลานที่เกิด สามารถชดเชยปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ถูกแทนที่

กรกฎ วิจิตรพงศ์ (พ.ศ. 2530) พบว่า ความสามารถทำงานได้ในปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย ในรูปของการยุบตัว การไหล และการทำให้แน่น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขี้เถ้าในส่วนผสม และขี้เถ้ามีคุณสมบัติลดน้ำ โดยการเติมขี้เถ้าลอยทุกๆ 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์จะสามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงได้ 0.03 เปอร์เซนต์ และระยะเวลาก่อ

ตัวที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นกับปริมาณขี้เถ้าลอย

Virgilio B. Columna (1974) สรุปว่า

กำลังรับแรงอัดและแรงดึง ของส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับขี้เถ้าแกลบ จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนผสม และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม

การคืบ (creep deformation) จะแปรผันตรงกับปริมาณขี้เถ้า แต่ความหนาแน่นอิ่มตัว จะแปรผันกลับกับปริมาณขี้เถ้าแกลบ

การขยายตัวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้าแกลบ จากการทดสอบทั้งหมดจะมีการหดตัวเฉลี่ย 95 เปอร์เซนต์

ความทนทาน จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้าแกลบ

Sjaiful Anwar Damer (1978) สรุปว่า

ขี้เถ้าแกลบสามารถจำแนกเป็น สารปัซโซลาน Class N ตามมาตราฐาน ASTM. C 618

การพัฒนากำลังของส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับขี้เถ้าแกลบ จะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนๆ ที่อายุช่วงแรก แต่หลังจาก 28 วันแล้วกำลังของส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับขี้เถ้าแกลบจะสูงกว่า และการผสมขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่า 30 เปอร์เซนต์ จะไม่ให้ผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงเมื่ออายุมากขึ้น

การหดตัวเมื่อแห้ง (Dry shrinkage) และการพองตัว (Swelling) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้า แต่ถ้าผสมน้อยกว่า 20 % จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดจนเห็นได้ชัด

ขี้เถ้าแกลบเป็นสารผสมเพิ่ม ที่ช่วยในการเทได้ในคอนกรีต